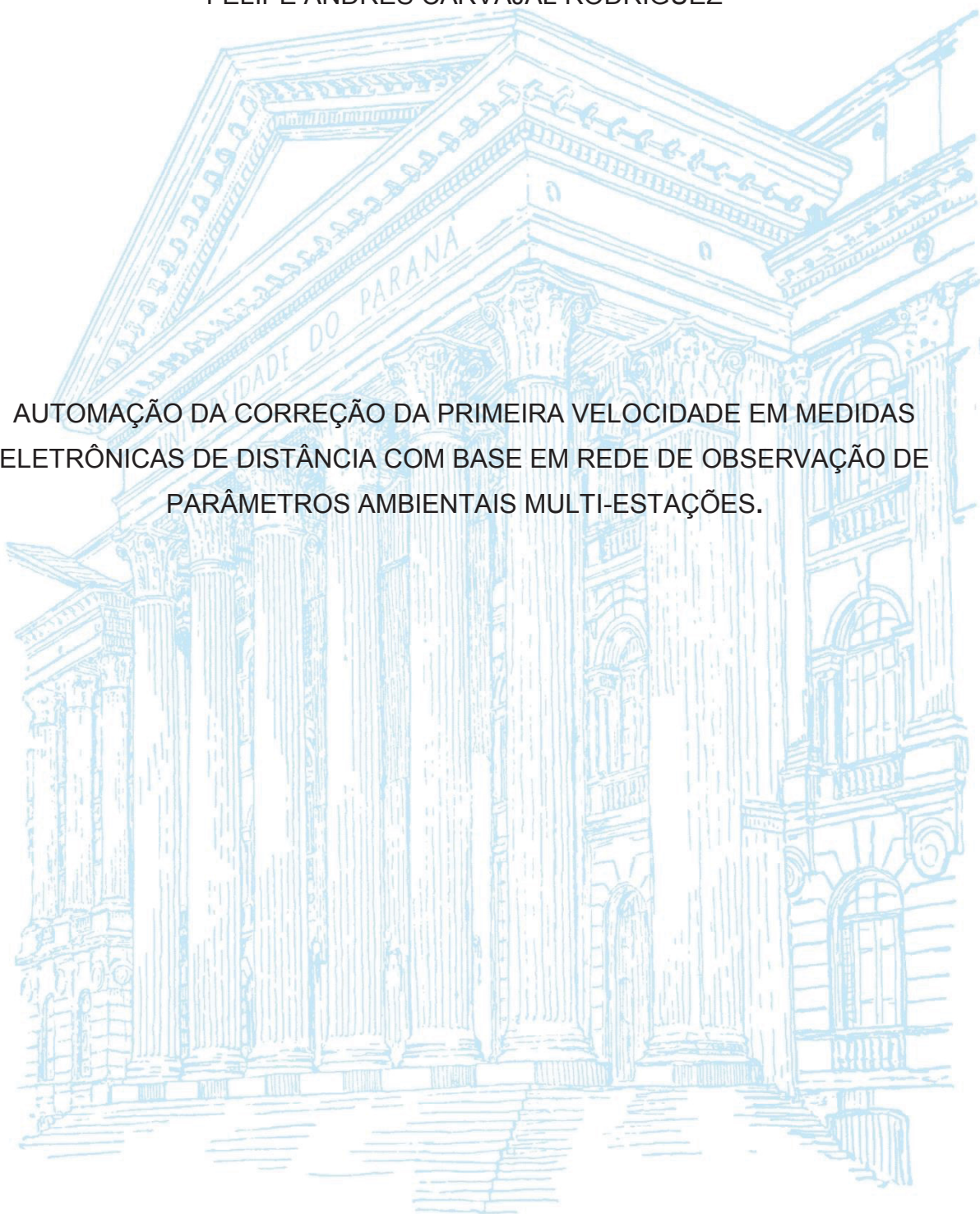


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FELIPE ANDRES CARVAJAL RODRIGUEZ

AUTOMAÇÃO DA CORREÇÃO DA PRIMEIRA VELOCIDADE EM MEDIDAS  
ELETRÔNICAS DE DISTÂNCIA COM BASE EM REDE DE OBSERVAÇÃO DE  
PARÂMETROS AMBIENTAIS MULTI-ESTAÇÕES.



CURITIBA

2018

FELIPE ANDRES CARVAJAL RODRIGUEZ

AUTOMAÇÃO DA CORREÇÃO DA PRIMEIRA VELOCIDADE EM MEDIDAS  
ELETRÔNICAS DE DISTÂNCIA COM BASE EM REDE DE OBSERVAÇÃO  
DE PARÂMETROS AMBIENTAIS MULTI-ESTAÇÕES.

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do grau de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Luís Augusto Koenig  
Veiga

Co-Orientador: Prof. Dr. Wilson de Alcântara  
Soares

CURITIBA

2018

Catalogação na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

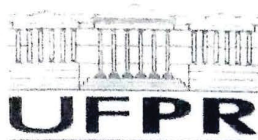
---

- C331a      Carvajal Rodriguez, Felipe Andrés  
              Automação da correção da primeira velocidade em medidas eletrônicas de distância com base em rede de observação de parâmetros ambientais multi-estações [Recurso eletrônico] / Felipe Andrés Carvajal Rodriguez – Curitiba, 2018.
- Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas.  
              Orientador: Luís Augusto Koenig Veiga  
              Coorientador: Wilson de Alcântara Soares
1. Distanciômetros eletrônicos. 2. Medidas eletrônicas. 3. Refração. I. Universidade Federal do Paraná. II. Veiga, Luís Augusto Koenig. III. Soares, Wilson de Alcântara. IV. Título.

CDD: 526.3

---

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



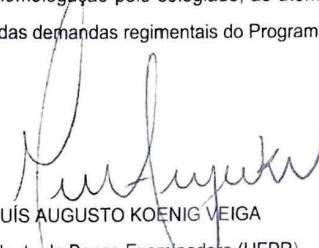
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS  
GEODÉSICAS - 40001016002P6

## TERMO DE APROVAÇÃO

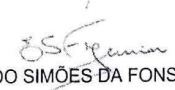
Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **FELIPE ANDRÉS CARVAJAL RODRÍGUEZ** intitulada: **AUTOMAÇÃO DA CORREÇÃO DA PRIMEIRA VELOCIDADE EM MEDIDAS ELETRÔNICAS DE DISTÂNCIA COM BASE EM REDE DE OBSERVAÇÃO DE PARÂMETROS AMBIENTAIS MULTI-ESTAÇÕES**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 17 de Dezembro de 2018.

  
LUÍS AUGUSTO KOENIG VEIGA  
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

  
PEDRO LUIS FAGGION  
Avaliador Interno (UFPR)

  
EDVALDO SIMÕES DA FONSECA JUNIOR  
Avaliador Externo (USP)

***A Carolina, A meus pais, Mono, família e amigos!***

## **AGRADECIMENTOS**

A Carolina pelo amor e a companhia neste oito anos e por aceitar este desafio, a meu pai Miguel, minha mãe Catalina, meu irmão Diego (mono) e a toda minha família e de Carolina, pela preocupação, o carinho e por acreditar em meu trabalho, muito obrigado!!!.

Ao prof. Dr. Luis Augusto Koenig Veiga pela orientação deste trabalho pela confiança, amizade, conselhos e o espaço para desenvolver esta pesquisa e por sempre ter tempo para resolver minhas dúvidas.

Ao prof. Wilson Alcântara Soares pela co-orientação, pela disposição e ajuda envolvida nesta pesquisa, em especial nos testes desenvolvidos no laboratório.

Ao professor Dr. Pedro Luis Faggion pela ajuda fornecida no desenvolvimento desta pesquisa, pela amizade e conselhos, pelos convites às campanhas de monitoramento de Mauá e Caxias.

Ao professor Edivaldo Fonseca Junior pelas considerações na banca de qualificação.

Ao professor Dr. Wander da Cruz e a Gloria pelas diferentes atividades de confraternização tanto em Curitiba como em Telêmaco Borba (obrigado também à família do professor)

A meus amigos Arturo, Michelle, Pedro, Romy, Lucianita, Vitorio, Daniel, Oscar, Vale, Kirby, Negra, pela paciência y preocupação durante estes dois anos. Aos amigos de Geocom, Oscarito, Mauricito, Eleazar, Aguila, Marce, Cristian (Chispa), Fernandito, Alexis (Xitico), Osvaldo, José, Patito, Erick, Franco, Hernan, Felipe, Nico, Eduardo.

Ao programa de pós-graduação de Ciências Geodésicas da Universidade Federal de Paraná e a seus professores em especial à professora Dra. Luciene Delazari pela ajuda no processo de postulação, também a seus funcionários Monica Kleuser, Fabi, Tanea e Mariney.

A Capes pela bolsa de estudos.

A Copel pela ajuda nos testes de campo na usina de Salto Caxias e Mauá.

A Andrea, Henry, Caissito, Marinalva, José, Lucy, Mario, Leone, niño David, Rhaissa, Andreina, Suzana e Ilich pela enorme ajuda fornecida em todo este tempo, muito obrigado!

A meus colegas do LAGAE Andreas e sua esposa Raquel, a Leandro por toda a ajuda, amizade, bons momentos em todo este tempo os quais foram muitos!!. A Samir e William

Aos integrantes do CPGCG Livia, Tulio, Jorge, Allan, Sergio, Christian, André, Pedrosa, Idalecio, Kaue, Francisco, Miguel, Niedja, Fabiano, Darlan.

A Ariel por la motivación, ayuda y disposición en el proceso de postulación, Al profesor Leonardo Molina por la ayuda y la recomendación CPGCG, Al profesor Juan Carlos Báez por la confianza y recomendación al CPGCG. Al profesor Héctor contreras por la ayuda en el proceso de postulación.

*Marichiweu !!!*



## RESUMO

O uso de medidores eletrônicos de distância (MED) é uma técnica empregada em estações totais para a determinação de distâncias entre estas e uma superfície refletora. Esta técnica baseia-se na propagação de ondas eletromagnéticas, a qual, através do conhecimento da velocidade de propagação e o tempo gasto em se deslocar no sistema emissor-refletor e vice-versa, permite obter a distância entre eles. A velocidade de propagação da onda depende do estado do meio de propagação, sendo que a densidade deste varia em função do comportamento dos parâmetros ambientais de pressão, umidade e temperatura, sendo esta última a que gera maior incerteza. A variação da velocidade é determinada através do cálculo do índice de refração, e sua quantificação em metros é obtida a partir da primeira correção de velocidade. Ambos os parâmetros são calculados de forma automática mediante inserção dos parâmetros de pressão, temperatura e umidade a serem aplicados no instante da observação de distância. Nesta pesquisa foi desenvolvida e automatizada uma rede de sensores de temperatura com objetivo de avaliar e considerar as variações deste parâmetro e sua incidência na determinação de distâncias no contexto do monitoramento geodésico de barragens. O sistema foi projetado e programado para que as observações de distâncias e medições de temperatura fossem realizadas simultaneamente. Portanto, foi possível determinar em tempo real as variações de temperatura, e verificar como estas afetam às distâncias. Os resultados mostraram a funcionalidade do método proposto, confirmando a necessidade de medir valores de temperatura durante a observação de redes de controle, bem como no decurso de coleta de pontos de monitoramento, já que em diferentes locações a temperatura apresentou variações em torno de 5 graus.

Palavras chaves: Distanciômetros eletrônicos. Refração. Primeira correção de Velocidade. Automação. Temperatura.

## **ABSTRACT**

The electronic distance meters is a technique used in total stations to determine the distances between this and a reflecting surface. This technique is based on the propagation of electromagnetic waves, which, through the knowledge of the propagation velocity and the time spent in moving from the system transmitter-receiver and vice versa, allows obtaining the distance between them. The wave propagation velocity depends on the conditions of the propagation medium which, its density varies according to the behavior of the environmental parameters such as pressure, humidity and temperature. The last one generates very significant uncertainties. The velocity variation is determined through the refraction index calculation, and its quantification in meters obtained from the first velocity correction. Both parameters are calculated automatically by inserting pressure, temperature and humidity parameters to be applied in the instant of distance observation. In this research, a temperature sensors network was developed and automated with the aim to evaluate and take into account the variations of this parameter and its incidence in the determination of distances in the context of dams geodetic monitoring. The system was designed and programmed for simultaneous distances observations and temperature measurements. Therefore, it was possible to determine in real time the temperature variations, and to verify how they affect the distances. The results showed the functionality of the developed system, confirming the need to measure temperature values during the observation of control networks, as well as while the collection of monitoring points, since at different locations the temperature showed variations around 5 degrees.

Key- words: Electronic meters. Refraction. First correction of Velocity. Automation. Temperature.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	- ONDAS MECÂNICAS E ELETROMAGNÉTICAS .....	25
FIGURA 2	- FREQUÊNCIA E COMPRIMENTO DE ONDA .....	26
FIGURA 3	- RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA .....	31
FIGURA 4	- DIREÇÃO DE UMA ONDA ELETROMAGNÉTICA.....	34
FIGURA 5	- COMPRIMENTO ELETROMAGNÉTICO.....	35
FIGURA 6	- PRINCÍPIO DE FERMAT.....	37
FIGURA 7	- LEI DE SNELL.....	38
FIGURA 8	- RAIOS CURVANDO-SE NA ATMOSFERA .....	39
FIGURA 9	- REFRAÇÃO HORIZONTAL E VERTICAL.....	39
FIGURA 10	- ÂNGULO DE REFRAÇÃO.....	40
FIGURA 11	- PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE EDM.....	45
FIGURA 12	- MÉTODO DE PULSO NA TECNOLOGIA MED.....	47
FIGURA 13	- DIAGRAMA DE FUNCIONAMENTO DO MÉTODO DE PULSO EDM .....	47
FIGURA 14	- PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO MED PARA DIFERENÇA DA FASE.....	48
FIGURA 15	- DIAGRAMA DE FUNCIONAMENTO DO MÉTODO DA FASE	51
FIGURA 16	- SEGUNDA CORREÇÃO DE VELOCIDADE – COEFICIENTE DE REFRAÇÃO .....	55
FIGURA 17	- MÉTODO DA LINHA DE REFERENCIA .....	58
FIGURA 18	- PROTOCOLO GEOCOM .....	66
FIGURA 19	- FUNÇÕES PRINCIPAIS DO PROTOCOLO GEOCOM .....	66

FIGURA 20 - REDE BÁSICA DO ZIGBEE .....	68
FIGURA 21 - TOPOLOGIAS ZIGBEE .....	69
FIGURA 22 - MÓDULO XBEE S2C .....	70
FIGURA 23 - PINOS XBEE .....	70
FIGURA 24 - PLACA ARDUINO UNO GENUÍNO .....	72
FIGURA 25 - SENSOR DE TEMPERATURA TMP36 .....	72
FIGURA 26 - SENSOR DE TEMPERATURA DS18B20 .....	73
FIGURA 27 - FAIXA DE PRECISÕES DO SENSOR DS18B20 .....	74
FIGURA 28 - REDES DE MONITORAMENTO .....	76
FIGURA 29 - METODOLOGIA GERAL .....	79
FIGURA 30 - DIAGRAMA GERAL DE FUNCIONAMENTO DO <i>SOFTWARE</i> PARA O CONTROLE DE ESTAÇÕES TOTAIS .....	82
FIGURA 31 - CONFIGURAÇÃO DE CORREÇÕES AMBIENTAIS .....	84
FIGURA 32 - CONFIGURAÇÃO DO ÂNGULO HORIZONTAL .....	84
FIGURA 33 - CONFIGURAÇÃO DO MÉTODO DE MEDIÇÃO MED .....	85
FIGURA 34 - CÓDIGOS DE CONTROLE <i>LEICA</i> GEOCOM .....	86
FIGURA 35 - FILTRAGEM DAS RESPOSTAS FORNECIDAS .....	87
FIGURA 36 - JANELA DO <i>SOFTWARE</i> PARA O CONTROLE DE ESTAÇÕES TOTAL .....	88
FIGURA 37 - CONEXÃO SENSOR DS18B20 - ARDUINO .....	90
FIGURA 38 - PROGRAMAÇÃO ARDUINO DS18B20 .....	91
FIGURA 39 - CONEXÃO XBEE - USB EXPLORER .....	91
FIGURA 40 - PINOS USB EXPLORER .....	92
FIGURA 41 - CONFIGURAÇÃO XBEE EM <i>SOFTWARE</i> XCTU .....	92

FIGURA 42 - REDE API CONFIGURADA NO SOFTWARE XCTU .....	93
FIGURA 43 - CONEXÃO ARDUINO E XBEE .....	94
FIGURA 44 - CODIGO TX API.....	95
FIGURA 45 - CÓDIGO RX API .....	95
FIGURA 46 - MENSAGEM DOS NODOS.....	96
FIGURA 47 - NODO DA REDE .....	96
FIGURA 48 - NODO DA REDE API .....	97
FIGURA 49 - NODOS QUE COMPÕEM A REDE API.....	97
FIGURA 50 - CONEXÃO ARDUINO - XBEE - COORDENADOR.....	98
FIGURA 51 - COORDENADOR DA REDE .....	99
FIGURA 52 - SISTEMA DE ENERGIZAÇÃO DOS NODOS DA REDE .....	99
FIGURA 53 - CIRCUITO DE ENERGIZAÇÃO PARA O NODO DA REDE .	100
FIGURA 54 - SENSOR COM PAINEL SOLAR .....	100
FIGURA 55 - DIAGRAMA DO FUNCIONAMENTO DO SOFTWARE .....	101
FIGURA 56 - JANELA DO SISTEMA INTEGRADO .....	102
FIGURA 57 - BANHO TERMOSTÁTICO.....	103
FIGURA 58 - SUPORTE PARA O TESTE DE COMPARAÇÃO SENSOR DS18B20, TMP36 E TERMÔMETRO PADRÃO .....	104
FIGURA 59 - SUPORTE TESTE PARA A COMPARAÇÃO DO SENSOR DS18B20, TMP36 E O TERMÔMETRO PADRÃO .....	104
FIGURA 60 - CIRCUITO TESTE PARA A COMPARAÇÃO DO SENSOR DS18B20, TMP36 E TERMÔMETRO PADRÃO.....	105
FIGURA 61 - SUPORTE PARA O TESTE DE COMPARAÇÃO DO SENSOR DS18B20 E TERMÔMETRO PADRÃO .....	109

FIGURA 62 -	SENSOR DS18B20 E TERMÔMETRO PADRÃO .....	109
FIGURA 63 -	MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA USINA DE SALTO CAXIAS .	114
FIGURA 64 -	USINA E BARRAGEM SALTO CAXIAS .....	114
FIGURA 65 -	REDE DE CONTROLE EXTERNA SALTO CAXIAS .....	115
FIGURA 66 -	REDE DE CONTROLE INTERNA, BARRAGEM SALTO CAXIAS.....	116
FIGURA 67 -	VISTA DO PILAR EGE05, SENSOR DE TEMPERATURA E COORDENADOR DA REDE DE MONITORAMENTO .....	117
FIGURA 68 -	VISTA DO PILAR EGE04, COORDENADOR DA REDE DE MONITORAMENTO DE TEMPERATURA E INGRESO DA GALERIA .....	117
FIGURA 69 -	SENSORES DE TEMPERATURA E COORDENADOR DA REDE NA ENTRADA DA GALERIA DA BARRAGEM SALTO CAXIAS.....	118
FIGURA 70 -	DISTANCIAS POSSÍVEIS ENTRADA GALERIA USINA SALTO CAXIAS.....	121
FIGURA 71 -	LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA NA BARRAGEM DE SALTO CAXIAS.....	122
FIGURA 72 -	SENSORES DE TEMPERATURA NA BARRAGEM SALTO CAXIAS.....	122
FIGURA 73 -	MAPA INTERPOLADO DE TEMPERATURAS.....	124
FIGURA 74 -	DISTRIBUIÇÃO DE PERFILES DE TEMPERATURA .....	125
FIGURA 75 -	COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA NA BARRAGEM SALTO CAXIAS .....	126
FIGURA 76 -	ELEMENTOS QUE INFLUENCIAM A TEMPERATURA NOS PRISMAS DE MONITORAMENTO.....	127

FIGURA 77 -	MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA USINA DE MAUA .....	128
FIGURA 78 -	BARRAGEM DA USINA DE MAUÁ .....	128
FIGURA 79 -	REDE DE MONITORAMENTO DA BARRAGEM DE MAUÁ .....	129
FIGURA 80 -	PRISMA ACIMA DA BARRAGEM DE MAUÁ .....	129
FIGURA 81 -	MONITORAMENTO DOS PRISMAS ACIMA DE BARRAGEM .....	130
FIGURA 82 -	POSIÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA NA BARRAGEM DE MAUÁ .....	131

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO .....	26
TABELA 2 - MICRO-ONDAS.....	27
TABELA 3 - ESPECTRO INFRAVERMELHO E VISÍVEL .....	27
TABELA 4 - COMPRIMENTO DE ONDA FREQUÊNCIA E PARA ESTAÇÕES TOTAIS DA <i>LEICA</i> .....	28
TABELA 5 - FREQUÊNCIA E COMPRIMENTO DE ONDA PARA ESTAÇÕES TOTAIS DE OUTRAS MARCAS .....	29
TABELA 6 - SUBSISTEMAS DO PROTOCOLO GEOCOM DA <i>LEICA</i> .....	67
TABELA 7 - ESPECIFICAÇÕES DO SENSOR DE TEMPERATURA TMP36 .....	73
TABELA 8 - INSTRUMENTOS EMPREGADOS EM MONITORAMENTO....	78
TABELA 9 - MATERIAIS EMPREGADOS NO DESENVOLVIMENTO DO <i>SOFTWARE</i> PARA O CONTROLE DE ESTAÇÕES TOTAIS ..	88
TABELA 10 - PRINCIPAIS PINOS XBEE.....	94
TABELA 11 - TESTE CHI QUADRADO PARA SENSORES DS18B20 E TMP36 .....	108
TABELA 12 - TEST CHI QUADRADO PARA O TESTE DO SENSOR DS18B20.....	110
TABELA 13 - TESTE DE RESPOSTA PARA 5 SENSORES DS18B20.....	113
TABELA 14 - DISTÂNCIA E PRECISÃO DAS DISTÂNCIAS CORRIGIDAS PELA PRIMEIRA VELOCIDADE.....	135



## LISTA DE GRÁFICOS

GRAFICO 1 - CURVA DE ERRO TÍPICO DO SENSOR DS18B20 .....	74
GRAFICO 2 - EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO TESTE DE COMPARAÇÃO .....	106
GRAFICO 3 - DIFERENÇAS DE TEMPERATURA PARA CADA SENSOR	107
GRAFICO 4 - COMPARAÇÃO DS18B20 E PADRÃO .....	110
GRÁFICO 5 - TEMPERATURA 5 SENSORES DS18B20.....	112
GRÁFICO 6 - TEMPERATURA PONTO DA REDE EXTERNA E INTERNA DA BARRAGEM SALTO CAXIAS.....	119
GRÁFICO 7 - VARIAÇÃO DA CORREÇÃO PPM .....	120
GRAFICO 8 - TEMPERATURA SIMULTANEAS DE 5 SENSORES.....	123
GRÁFICO 9 - TEMPERATURA DOS SENSORES DE TEMPERATURA NA BARRAGEM DE MAUÁ .....	132
GRÁFICO 10 - TEMPERATURA DOS SENSORES DE TEMPERATURA NA BARRAGEM DE MAUA .....	133
GRÁFICO 11 - MAGNITUDE DE CORRECAO DE VELOCIDADE P03-PM04. ....	134
GRÁFICO 12 - MAGNITUDE DE CORRECAO DE VELOCIDADE P03 – PM59 .....	135

## Lista de Siglas

<i>API</i>	-	<i>Application Programming Interface</i>
<i>ASCII</i>	-	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
<i>DABAMOS</i>	-	<i>Database-oriented Monitoring System</i>
<i>DIMONS</i>	-	<i>Displacement Monitoring System</i>
<i>DORIS</i>	-	<i>Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite</i>
<i>EDM</i>	-	<i>Electronic measurement distance</i>
<i>EDM</i>	-	<i>Electronic distance measurement</i>
<i>EHF</i>	-	<i>Extremely high frequency</i>
<i>ELF</i>	-	<i>Extremely low frequency</i>
<i>FIR</i>	-	<i>Far infrared</i>
<i>GND</i>	-	<i>ground</i>
<i>GNSS</i>	-	<i>Global Navigation Satellite System, GNSS</i>
<i>GOCA</i>	-	<i>GNSS/LPS Based Online Control and Alarm System</i>
<i>GSI</i>	-	<i>Geo Serial Interface</i>
<i>GSM</i>	-	<i>Global System for Mobile Communications</i>
<i>HF</i>	-	<i>High Frequency</i>
<i>IDE</i>	-	<i>Integrated Development Environment</i>
<i>IEEE</i>	-	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<i>ISM</i>	-	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
<i>LF</i>	-	<i>Low Frequency</i>
<i>LLR</i>	-	<i>Lunar Laser Ranging</i>
<i>MED</i>	-	<i>Medidor eletrônico distancia</i>
<i>MF</i>	-	<i>Medium frequency</i>
<i>MIR</i>	-	<i>Medium infrared</i>
<i>NIR</i>	-	<i>Near infrared</i>
<i>RPC</i>	-	<i>Open Network Computing Remote Procedure Call</i>
<i>SHF</i>	-	<i>Super High Frequency</i>
<i>SLR</i>	-	<i>Satelite laser ranging</i>
<i>STAM</i>	-	<i>The simple two-layer atmospheric temperature model</i>
<i>STREAM</i>	-	<i>Range EDM atmospheric temperature model</i>
<i>TTM</i>	-	<i>Turbulence Transfer Model</i>

<i>UHF</i>	- <i>Ultra High Frequency</i>
<i>USB</i>	- <i>Universal Serial Bus</i>
<i>VDD</i>	- <i>Positive supply voltage</i>
<i>VHF</i>	- <i>Very High Frequency</i>
<i>VLBI</i>	- <i>Very long baseline interferometry</i>
<i>VLF</i>	- <i>Very Low Frequency</i>
<i>WIFI</i>	- <i>Wireless Fidelity</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA .....	21
1.2	HIPOTESES .....	21
1.3	OBJETIVO GERAL.....	21
1.4	OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	22
1.5	JUSTIFICATIVA .....	22
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>25</b>
2.1	INTRODUÇÃO .....	25
2.1.1	Espectro eletromagnético .....	26
2.1.2	Propagação de ondas eletromagnéticas .....	29
2.2	REFRAÇÃO .....	32
2.2.1	Índice de refração.....	33
2.2.2	Princípio de Fermat .....	35
2.2.3	Coeficiente de refração .....	37
2.2.4	Grupo do índice de refração.....	41
2.2.5	Refração na atmosfera .....	44
2.2.5.1.1	Temperatura .....	44
2.2.5.1.2	Pressão .....	44
2.2.5.1.3	Umidade .....	45
2.3	MEDIDA ELETRÔNICA DA DISTÂNCIA (MED) .....	45
2.3.1	Princípios.....	45
2.3.2	Método de Pulso.....	46
2.3.3	Método de fase.....	48
2.4	CORREÇÕES ATMOSFÉRICAS APLICADAS À MED .....	51
2.4.1	Correções de velocidade .....	51
2.4.1.1	Índice de refração de referência .....	52
2.4.1.2	Primeira correção de velocidade (K').....	52
2.4.1.3	Segunda correção de velocidade (K'').....	55
2.4.2	Modelos de correção baseados na turbulência atmosférica.....	56
2.4.3	Método da linha de referência .....	57
2.5	AUTOMAÇÃO NA GEODÉSIA.....	59
2.5.1	Interfaces.....	62

2.6	FERRAMENTAS DE DESENVOLVIMENTO .....	65
2.6.1	Protocolo de comunicação GeoCom .....	65
2.6.2	Protocolo de comunicação Zigbee .....	67
2.6.3	Módulo XBee .....	70
2.6.4	Arduino .....	71
2.6.5	Sensores de temperatura .....	72
2.6.5.1	Sensor TMP36.....	72
2.6.5.2	Sensor DS18B20 .....	73
2.7	MONITORAMENTO GEODÉSICO DE ESTRUTURAS .....	75
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>79</b>
3.1	DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE PARA O CONTROLE DE UMA ESTAÇÃO TOTAL .....	81
3.2	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE TEMPERATURA .....	89
3.2.1	Arduino e sensor DS1820 .....	89
3.2.2	Configuração Xbee .....	91
3.2.3	Integração Xbee – Arduino .....	93
3.2.4	Configuração do sensor ou nodo da rede .....	96
3.2.5	Configuração do coordenador da rede .....	98
3.2.6	Fonte de energia ou Alimentação dos sistemas .....	99
3.3	INTEGRAÇÃO DOS SISTEMAS DE CONTROLE E AQUISIÇÃO .....	101
<b>4</b>	<b>EXPERIMENTOS E RESULTADOS: .....</b>	<b>103</b>
4.1	COMPARAÇÃO DE SENSORES DE TEMPERATURA DS18B20 E TMP36 .....	103
4.2	RESPOSTAS DOS SENSORES 18650 .....	112
4.3	EXPERIMENTOS EM CAMPO.....	113
4.3.1	Usina de Salto Caxias .....	113
4.4	USINA DE MAUÁ .....	127
4.4.1	Resultados .....	132
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>137</b>
<b>6</b>	<b>RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>141</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>142</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Na atualidade, a principal técnica de medição empregada nos instrumentos de medição Geodésicos baseia-se no uso da radiação eletromagnética, é a partir desta que são geralmente obtidas distâncias entre o instrumento e um ponto de interesse. De acordo com a técnica empregada, tanto o espectro eletromagnético como o parâmetro medido da onda difere. Geralmente são medidas a amplitude, a fase, o ângulo de chegada, a frequência e polarização da onda (BRUNNER,1984; RÜEGER,1990). Em observações Terrestres utiliza-se parte do espectro infravermelho e laser visível, enquanto para observações espaciais empregam-se as micro-ondas.

No caso das observações Geodésicas Terrestres, o meio de propagação eletromagnético é a baixa atmosfera. Nesta porção da atmosfera as variações de pressão, temperatura e umidade são uma fonte de incerteza na determinação de distâncias, já que ao mudar estes parâmetros, a atmosfera modifica sua densidade o que afeta diretamente a velocidade de propagação das ondas (TORGE, 2001; BRUNNER, 1984; FRASER, 1981; HIRT et al., 2010). A quantificação na mudança da velocidade de propagação de uma onda no meio é expressa mediante o índice de refração, determinado em função do comprimento da onda eletromagnética radiada e das condições ambientais do meio de propagação (BRUNNER,1984).

As condições ambientais envolvem a medição da pressão, temperatura e umidade no percurso de uma onda eletromagnética. Na prática, a capacidade de obter estes valores condicionam a correta determinação do índice de refração e portanto, a precisão das distâncias obtidas (RÜEGER, 1990).

A influência dos parâmetros atmosféricos no índice de refração para o espectro infravermelho e luz visível foram analisados por Rüeger (1990), dando como resultado a alta dependência deste com respeito às variações de temperatura. Na mesma linha de pesquisa Angus-leppan e Brunner (1980) consideram que a pressão e umidade têm variações regulares na baixa atmosfera, enquanto a temperatura apresenta variações irregulares.

A alta sensibilidade do índice de refração com respeito à temperatura é explicada pela estratificação térmica na baixa atmosfera, a qual depende da capacidade de absorção e radiação de calor da superfície abaixo do percurso

da onda. Esta condição gera variações nos valores do gradiente vertical de temperatura, o que torna complexa sua correta determinação (ANGUS-LEPPAN; BRUNNER, 1980 ; HORVÁTH, 1974).

Os instrumentos Geodésicos, em particular os usados em observações terrestres, são capazes de obter altas precisões que só são limitadas pelos efeitos atmosféricos (BRUNNER, 1984). No caso do monitoramento Geodésico desenvolvido com estações totais, as distâncias obtidas com base na tecnologia MED (*medição eletrônica de distancias*), precisam ser determinadas com alta precisão e os erros associados em sua determinação devem ser cuidadosamente tratados. Da mesma forma, os efeitos sobre as direções horizontais e verticais devem ser abordadas (OGUNDARE, 2015; CHEN YONG, 1983).

O avanço tecnológico na área da instrumentação Geodésica terrestre teve uma rápida evolução. Para Kennie e Petrie (1993), os desenvolvimentos na microeletrônica permitem substituir os mecanismos de medição por componentes eletrônicos, além de integrar microprocessadores, o que gera um aumento na produtividade devido à automação dos processos, sem diminuir e às vezes melhorando a precisão das observações. Além da evolução nos elementos de medição, o desenvolvimento tecnológico permite a integração de diferentes sensores nos instrumentos Geodésicos. No caso das estações totais, na atualidade alguns modelos consideram em seu projeto sensores atmosféricos (pressão, temperatura, umidade), sensores de inclinação, servomotores, entre outros. Também neste contexto alguns fabricantes de instrumentos Geodésicos fornecem protocolos de comunicação e códigos para o controle de seus instrumentos, permitindo os desenvolvimentos de aplicativos que possam acessar diretamente as observações do instrumento ou até mesmo controlá-lo totalmente.

No que diz respeito às correções atmosféricas, os avanços tecnológicos na instrumentação Geodésica tornam possível corrigir os efeitos atmosféricos sobre as distâncias e direções, através da automação do cálculo do índice e coeficiente de refração definidas como primeira e segunda correção de velocidade respectivamente. Porém, ambas correções são aplicadas de forma parcial já que a pressão e umidade, além da estratificação térmica explicada por Horváth (1974), não são constantes no percurso da onda. Para

Brunner (1984) as observações devem ser corrigidas para o valor da integral do índice de refração ao longo do percurso da onda.

Nesta dissertação busca-se um modo de minimizar a incerteza gerada pela correção da distância medida usando a observação dos parâmetros ambientais apenas na posição do instrumento de medição, como é realizado atualmente nos trabalhos de campo. Procura-se uma modelagem da temperatura no contexto do monitoramento Geodésico de estruturas, para isto é posposto o desenvolvido um sistema de aquisição de temperaturas em múltiplos pontos que forneça dados em tempo real e um *software* que permita o controle e integração do sistema e uma estação total.

## 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

A incerteza que provoca a temperatura na obtenção do índice de refração e, portanto, na determinação de distâncias com base na tecnologia EDM, pode ser diminuída mediante um sistema que integre a aquisição e a modelagem da temperatura na baixa atmosfera, baseado na aquisição de temperatura em diversos pontos simultaneamente na área de realização das observações geodésicas?

## 1.2 HIPOTESE

Se for desenvolvido um sistema de aquisição de temperatura que obtenha de forma continua medidas representativas da mesma para a região onde uma onda eletromagnética é propagada, então é possível diminuir a incerteza gerada por este parâmetro no índice de refração e, portanto nas distâncias obtidas por MED, mediante uma modelagem matemática que forneça um valor mais representativo da temperatura.

## 1.3 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um sistema automatizado que integre a aquisição e modelagem da temperatura na baixa atmosfera através de rede multipontos.



#### 1.4 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- a) Desenvolver e automatizar um sistema de aquisição de temperatura;
- b) Desenvolver um *software* para a comunicação com uma estação total voltado à configuração automática dos valores dos parâmetros ambientais;
- c) Modelar os dados de temperatura fornecidos pelo sistema de aquisição;
- d) Desenvolver uma aplicação que permita a integração entre uma estação total e o sistema de aquisição de temperatura;
- e) Avaliar a modelagem dos dados de temperatura com respeito às variações de distâncias obtidas da estação total (correções de primeira velocidade).

#### 1.5 JUSTIFICATIVA

A determinação dinâmica ou estática de coordenadas de um ponto sobre a Terra, o mar ou no espaço, em relação a um sistema de coordenadas implícito, é chamada “posicionamento”, este termo geralmente é usado em Geodésia como um sinônimo para a “*determinação de posições*” (VANICEK; KRAKIWSKY, 1986).

O posicionamento é usado em diversas áreas da engenharia e da ciência para o desenvolvimento projetos ou pesquisas. No caso da engenharia, Ogundare (2015) faz uma classificação respeito à área de aplicação do posicionamento:

- a) Redes de controle Geodésico: Posicionamento que considera o tamanho e forma da Terra, são usados os princípios da Geodésia e geralmente compreende extensas áreas;
- b) Monitoramento Geodésico: Posicionamento associado a análise de um fenômeno natural (terremotos, deslizamentos de terra, movimento da crosta Terrestre) ou estruturas feitas pelo homem (pontes, edifícios, túneis, barragens e minas) no tempo;
- c) Engenharia Geodésica: Posicionamento para o desenvolvimento de diferentes projetos aplicando métodos geodésicos rigorosos para

controlar e apoiar projetos que incluem a construção e manutenção de túneis, pontes, usinas hidrelétricas, ferrovias e assim por diante;

- d) Topografia industrial: O uso de técnicas de medição de precisão para posicionamento e alinhamento de máquinas industriais e aparelhos científicos. Este trata do alinhamento de componentes de antenas grandes (parabólicas, planas, etc.), verificando a qualidade dimensional das várias sub-montagens que formam a estrutura;
- e) Pesquisas e educação: Estudo, avaliação e experimentação científica de ideias sobre diferentes métodos de posicionamento. Eles fornecem procedimentos de testes teóricos e práticos para diferentes sistemas de observação.

Para cada uma das áreas definidas por Ogundare (2015), a precisão no posicionamento depende do instrumento usado, do método de observação empregado e dos erros presentes nas observações. Para Mikhail e Gordon (1983) os erros podem ser classificados em:

- a) Grosseiros: São causados por falhas do operador ou erros nos instrumentos empregados no processo de observação;
- b) Sistemáticos: Tem uma origem conhecida e seu valor pode ser modelado;
- c) Aleatórios: Não tem origem conhecida e seguem uma distribuição estatística.

Neste contexto na área de monitoramento Geodésico, precisa-se de observações com uma alta precisão e representatividade, já que desta forma é possível avaliar o comportamento do posicionamento no tempo (OGUNDARE, 2015), considerando isso, os erros definidos por Mikhail e Gordon (1983) devem ser cuidadosamente tratados com o objetivo de que estes não gerem incertezas no posicionamento.

O uso de métodos de posicionamentos utilizando estações totais no monitoramento Geodésico fornece observações de distâncias e direções, que permitem obter o posicionamento numa época determinada. No caso das distâncias, sua determinação é com base na tecnologia MED, a qual é afetada por um erro provocado pelos parâmetros atmosféricos de pressão, temperatura

e umidade, os quais mudam a densidade da atmosfera, provocando variações na velocidade de propagação e, portanto, afetando o cálculo das distâncias. O erro gerado é quantificado mediante o índice de refração, o qual é amplamente dependente da temperatura, devido às variações desta com a altitude e suas estratificações dependentes da capacidade de absorção e radiação de calor da superfície Terrestre (RÜEGER, 1990).

No monitoramento Geodésico feito mediante instrumentos eletro-ópticos geralmente os desníveis, entre o ponto de observação e o refletor, são maiores, isto faz com que o percurso da onda eletromagnética se desloque por diferentes estratos térmicos, além de que as superfícies embaixo do trajeto da onda irradiam o calor em diferentes magnitudes gerando gradientes térmicos irregulares.

Considerando-se os elementos apresentados nos parágrafos anteriores, é necessário avaliar as incertezas no índice de refração provocadas pelas diferenças de temperatura e os efeitos na determinação de distâncias obtidas com base na tecnologia MED no contexto do monitoramento Geodésico. Uma maior representatividade na amostragem da temperatura no local da observação permitirá que os erros sistemáticos decorrentes de fatores atmosféricos, sejam melhor modelados, portanto o posicionamento do ponto monitorado tenha um menor erro associado.

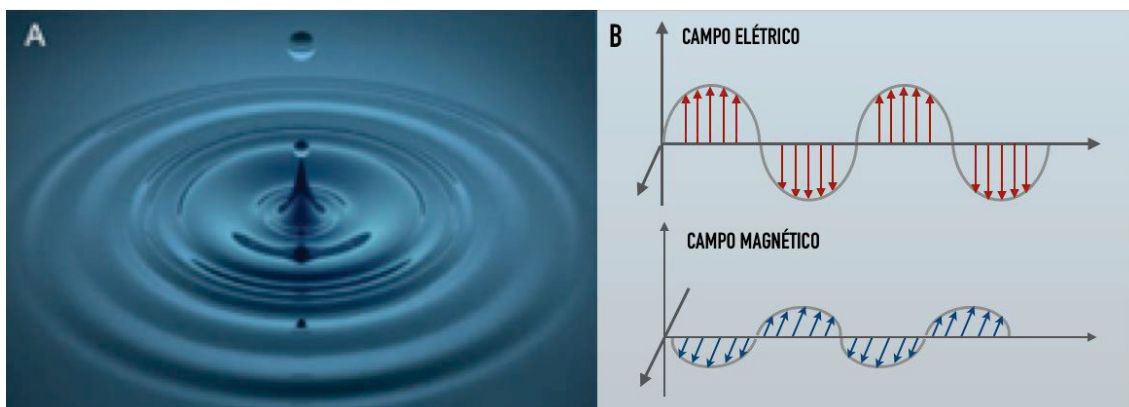
## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 INTRODUÇÃO

Uma das formas mais importante para transporte de energia na Terra é através da propagação de ondas mecânicas e eletromagnéticas. Em ambos casos as mesmas podem ser definidas por três elementos; comprimento da onda ( $\lambda$ ), amplitude ( $A$ ) e frequência ( $f$ ), dos quais podem ser derivados parâmetros como velocidade, período, comprimento do percurso da onda, etc.

No caso das ondas mecânicas estas são provocadas por uma perturbação de um elemento, sólido, gasoso, líquido ou plasmático. Sua propagação precisa de meio (FIGURA 1 - A). Enquanto as ondas eletromagnéticas são geradas pela interação mediante vibrações entre o campo elétrico e o campo magnético, ou seja, através da oscilação destes. Ao contrário das ondas mecânicas, as ondas eletromagnéticas podem-se propagar no vácuo em alguns meios materiais, podendo estes ser meios gasosos, líquidos ou sólidos (FIGURA 1 - B).

FIGURA 1 - ONDAS MECÂNICAS E ELETROMAGNÉTICAS

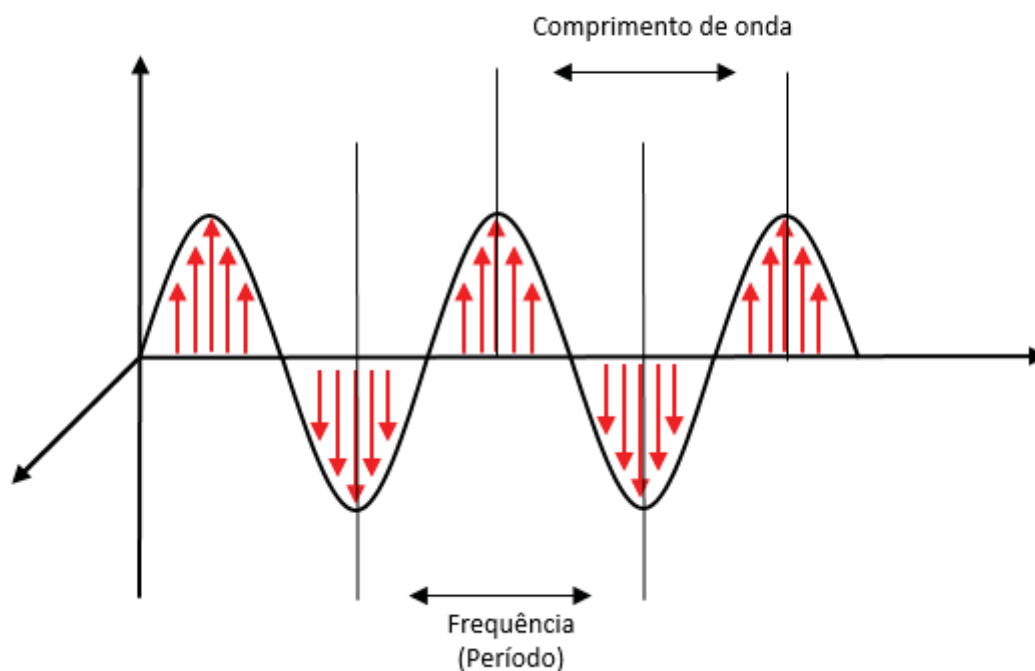


FONTE: Adaptado de NASA (2016)

A energia transportada pelas ondas eletromagnéticas depende de três componentes: a frequência, o comprimento da onda e a amplitude. A frequência pode ser definida como o número de ciclos por intervalo de tempo; o comprimento de onda corresponde à distância entre duas cristas (FIGURA 2).

Neste contexto é definido o espectro eletromagnético, o qual apresenta as distintas frequências e comprimentos de ondas.

FIGURA 2 - FREQUÊNCIA E COMPRIMENTO DE ONDA



FONTE: Adaptado de NASA (2016)

### 2.1.1 Espectro eletromagnético

A classificação relacionada ao comprimento da onda  $\lambda$ , frequência  $f$  e o tipo de radiação é apresentada por Rüeger (1990) de acordo à TABELA 1:

TABELA 1 - ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

Tipo de Radiação	Comprimento da onda $\lambda$ (m)	(Continua)
		Frequência $f$ (Hz)
Raios X	$1,6 \times 10^{-11} - 6,6 \times 10^{-8}$	$1,9 \times 10^{19} - 4,5 \times 10^{15}$
Ultravioleta	$1,4 \times 10^{-8} - 3,6 \times 10^{-7}$	$2,2 \times 10^{16} - 8,3 \times 10^{14}$
Luz visível	$3,6 \times 10^{-7} - 7,8 \times 10^{-7}$	$8,3 \times 10^{14} - 3,8 \times 10^{14}$
Infravermelho	$7,8 \times 10^{-7} - 3,4 \times 10^{-4}$	$3,8 \times 10^{14} - 8,8 \times 10^{11}$
Ondas de radio		
EHF	$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-2}$	$3 \times 10^{10} - 3 \times 10^{11}$
SHF	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-1}$	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{10}$
UHF	$1 \times 10^{-1} - 1$	$3 \times 10^8 - 3 \times 10^9$
VHF	$1 - 10$	$3 \times 10^7 - 3 \times 10^8$
Televisão		
Alta HF	$10 - 100$	$3 \times 10^6 - 3 \times 10^7$

TABELA 1 - ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

Tipo de Radiação	Comprimento da onda $\lambda$ (m)	(Conclusão) Frequência $f$ (Hz)
Meio MF	$10^2 - 10^3$	$3 \times 10^5 - 3 \times 10^6$
Baixo LF	$10^3 - 10^4$	$3 \times 10^4 - 3 \times 10^5$
Baixo VLF	$10^4 - 10^5$	$3 \times 10^3 - 3 \times 10^4$
Extra ELF	$10^5 - 10^6$	$3 \times 10^2 - 3 \times 10^3$

FONTE: Adaptado de Rüeger (1990)

As ondas de rádio que pertencem às bandas SHF e UHF e parte das EHF e VHF são tradicionalmente denominadas de micro-ondas, que tem uma subdivisão de acordo à TABELA 2.

TABELA 2 - MICRO-ONDAS

Banda	Comprimento da onda $\lambda$	Frequência $f$ (GHz)
Banda V	5,3 mm - 6,5 mm	46 – 56
Banda Q	6,5 mm - 8,3 mm	36 – 46
Banda K	8,3 mm - 27,5 mm	10,9 – 36
Banda X	27,5 mm - 57,7 mm	5,2 – 10,9
Banda S	57,7mm - 0,194 m	1,55 – 5,2
Banda L	0,194 m - 0,769 m	0,39 – 1,55
Banda P	0,769 m - 1,333 m	0,225 – 0,390

FONTE: Adaptado de Rüeger (1990)

De acordo com Rüeger (1990), as micro-ondas geralmente são empregadas para comunicação, incluindo transmissão de satélite e em sistemas de radar. No caso do espectro infravermelho é dividido em quatro divisões (TABELA 3):

TABELA 3 - ESPECTRO INFRAVERMELHO E VISÍVEL

Infravermelho	Comprimento da onda $\lambda$
Infravermelho próximo NIR	0,76 $\mu\text{m}$ – 3,0 $\mu\text{m}$
Infravermelho médio próximo MIR	3,0 $\mu\text{m}$ – 6,0 $\mu\text{m}$
Infravermelho longe FIR	6,0 $\mu\text{m}$ – 15,0 $\mu\text{m}$
Infravermelho extremo XIR	15,0 $\mu\text{m}$ – 1mm

FONTE: Adaptado de Rüeger (1990)

Ainda segundo Rüeger (1990), a radiação NIR tem características de propagação próximas da luz visível e isso facilita seu uso tanto em sistemas de comunicação óptica (fibras de vidro) e MED. Como exemplo, na TABELA 4 são

apresentados os parâmetros de frequência e comprimento de onda para as estações totais da marca *Leica*.

TABELA 4 - COMPRIMENTO DE ONDA FREQUÊNCIA E PARA ESTAÇÕES TOTAIS DA *LEICA*

<b>Series / modelos</b>	<b>Comprimento de onda (nm)</b>	<b>Frequência (Mhz)</b>
TPS1000 TPS2000 TPS5000	850	50
TPS100 TPS300 TPS400 TPS700 TPS800 TPS1100 TPS1200	780	100
TPS400/800 TPS1200 (2007) NOVA TS30 E TM30 VIVA FlexLine	658	100

FONTE: Adaptado CR Kennedy Survey (2016)

As frequências e comprimentos de onda de outras marcas são apresentadas na TABELA 5.

TABELA 5 - FREQUÊNCIA E COMPRIMENTO DE ONDA PARA ESTAÇÕES TOTAIS DE OUTRAS MARCAS

<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>	<b>Frequência (MHz)</b>	<b>Comprimento de onda (nm)</b>
Trimble	S3, S6, S8	400,04	660
Topcon	GTS-502E, 512E, GTS-601, 602, 603, 605, GTS-601N, 602N, 603N, 605N	29,97	820
Topcon	GTS 201 D, 202. 203, GTS 211 D, 212, 213	14,99	820
Sokkia	SET 330R, SET 3030 R, SET 3130 R, SET 4110, SRX 3	74,93	690

FONTE: O autor (2018)

### 2.1.2 Propagação de ondas eletromagnéticas

A propagação de uma onda eletromagnética está definida pela relação entre frequência  $f$  e comprimento da onda  $\lambda$  em um determinado espectro eletromagnético. A relação fornece em uma primeira instância a velocidade de propagação da onda num meio. Esta pode ser obtida da seguinte equação (RÜEGGER, 1990; VANICEK; KRAKIWSKY, 1986; BOMFORD, 1952; TORGE, 2001):

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2.1)$$

Onde

$v$ : Velocidade de uma onda eletromagnética em um meio, normalmente é definida como a velocidade da luz em um médio;

$f$ : Frequência da onda;

$\lambda$ : Comprimento da onda.

Em uma segunda etapa é possível obter a distância do percurso da onda eletromagnética entre duas estações. Neste caso o módulo e a velocidade da onda dependem da frequência do sinal e do estado do meio, o qual este sujeito a vários fatores, dentro deles a pressão atmosférica, a



umidade e a temperatura, sendo esta última importante para este trabalho. A distância (EQUAÇÃO 2.2) entre duas estações necessita do tempo de propagação da onda:

$$d = v\Delta t \quad (2.2)$$

Onde:

$d$ : Distância entre duas estações;

$\Delta t$ : tempo de propagação desde a primeira até a segunda estação;

$v$ : Velocidade de uma onda eletromagnética em um meio, normalmente é definida como a velocidade da luz em um meio.

Nas EQUAÇÕES (2.1) e (2.2) a velocidade da luz no meio, pode ser obtida a partir da velocidade da luz no vácuo e do índice de refração no meio, o qual é definido por:

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.3)$$

$$v = \frac{c}{n} \quad (2.4)$$

Onde:

$n$ : Índice de refração no meio;

$c$ : Velocidade da luz no vácuo;

$v$ : Velocidade da luz no meio.

A velocidade da luz no vácuo é uma constante física determinada experimentalmente, na atualidade o valor da velocidade da luz no vácuo é 299,792458 m/s (THOMPSON; TAYLOR, 2008), enquanto, o índice de refração depende da frequência do sinal e dos parâmetros de pressão, temperatura e umidade no meio de propagação. (RÜEGGER, 1990).

A obtenção de distâncias mediante radiação eletromagnética (FIGURA 3) é uma técnica amplamente usada na Geodésia, onde uma das dificuldades é a obtenção do tempo de percurso da onda eletromagnética entre duas estações, o que geralmente é provocado pelas mudanças no meio de propagação que afeta diretamente a velocidade de propagação. O tempo de propagação pode ser obtido relacionando os parâmetros de radiação e propagação de uma onda eletromagnética, mediante a seguinte equação trigonométrica:

$$Y = A \sin(\omega \cdot t) \quad (2.5)$$

$$Y = A \cdot \sin \phi \quad (2.6)$$

Onde:

$A$ : amplitude da onda;

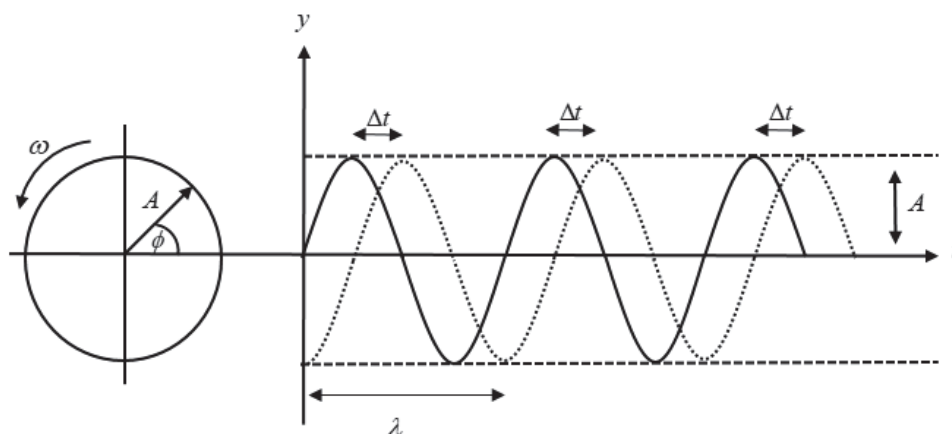
$\omega$ : velocidade angular do sinal;

$f$ : frequência do sinal;

$t$ : tempo;

$\phi$ : ângulo da fase que determina o avanço do sinal no tempo.

FIGURA 3 - RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA



FONTE: Adaptado de Deumlich (1982) e Rüeger (1990)

O ângulo da fase pode ser escrito como:

$$\phi = \omega \cdot t \quad (2.7)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (2.8)$$

Considerando as diferenças de tempo  $\Delta t$  geradas pelas diferentes fases, produto da constante radiação eletromagnética, as EQUAÇÕES 2.5 e 2.6 podem ser escritas como:

$$Y = A \text{ sen}(\phi + \Delta\phi) \quad (2.9)$$

$$Y = A \text{ sen} (\omega \cdot (t + \Delta t)) \quad (2.10)$$

Onde:

$\Delta t$ : tempo de espera;

$\Delta\phi$ : variação do ângulo de fase.

Finalmente a variação do ângulo de fase, pode ser escrita em função do tempo de espera:

$$\Delta\phi = \Delta t \cdot \omega \quad (2.11)$$

$$\Delta T = \frac{\Delta\phi}{\omega} \quad (2.12)$$

## 2.2 REFRAÇÃO

Os primeiros relatos sobre a refração têm uma origem aproximada em 130 A.C. Nesta data Claudius Ptolomeu notou que os corpos celestes são observados ligeiramente acima de suas posições reais. Além disto, ele observou os ângulos de incidência no ar e valores preliminares de refração na água. Porém, suas pesquisas não conseguiram desenvolver uma formulação matemática para explicar seus resultados e o fenômeno da refração. Somente em 1621 que Snell postulou a “lei de refração”, a qual fornece uma variável  $k$  que envolve os parâmetros do meio onde é visada uma direção, seus resultados só foram publicados em 1632.

Antes das pesquisas de Snell, Tycho Brahe em 1587 quantificou medições de refração astronômica. Posteriormente, já em 1600, Kepler publicou uma teoria sobre refração astronômica, quando ainda não eram conhecidas as leis deste fenômeno. O primeiro cientista a desenvolver a teoria

proposta por Snell foi Cassini em 1656. Seus resultados coincidiram com os propostos por Brahe e Kepler, com respeito ao conceito de atmosfera esférica com densidade constante, o que implica que a refração só é desenvolvida no limite superior da atmosfera (BRUNNER, 1992).

Em 1637, René Descartes publicou a formulação matemática para a lei de refração em função de senos. Nesta, ele considera a variável  $k$  como uma porcentagem da velocidade de propagação de uma onda. O valor de  $k$  é determinado com base na densidade do meio de propagação, com  $k > 1$  a propagação de uma onda é feita um meio mais denso que o anterior, o que implica uma menor velocidade de propagação.

Contrário ao proposto por Descartes, em 1657, Pierre de Fermat postulou o princípio “do tempo mínimo”, ou seja, o tempo de percurso entre dois pontos é o mínimo. O princípio proposto por Fermat foi baseado nas pesquisas de Snell, mas o princípio teórico foi desenvolvido pelo primeiro. Desta forma é possível deduzir que a velocidade da luz na água é menor que no ar, por sua composição. Os fundamentos de Fermat são baseados na observação dos ângulos de refração (Snell) nestes meios. Já no século 17, foram propostas teorias a respeito da geometria da luz e a teoria de Newton sobre a propagação mecânica de partículas (BRUNNER, 1992).

### 2.2.1 Índice de refração

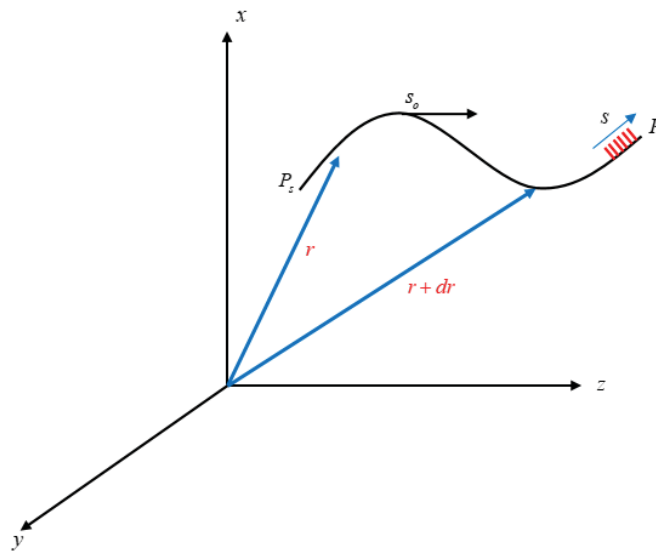
O índice de refração ( $n$ ) apresentado na EQUAÇÃO 2.4 pode ser definido como a quantificação da perda de velocidade de uma onda eletromagnética devido ao estado do meio de propagação (BRUNNER, 1984). Em grandes escalas, a atmosfera é considerada um meio de propagação de camadas esféricas com índices de refração que diminuem com a altitude em função dos gradientes de temperatura, umidade e pressão, os quais diminuem com a altitude (BRUNNER, 1984; TORGE, 2001)

A direção da onda eletromagnética na atmosfera é obtida ponto a ponto pelo raio eletromagnético, o qual corresponde a uma linha traçada na direção de propagação da onda em um instante ( $t$ ). Desta forma é feita a transferência de energia desde um ponto de interesse. Independente da distribuição da radiação eletromagnética em diferentes direções é possível mediante relações

geométricas modelar alguns aspectos importantes do fenômeno (SOLIMINI, 2016). A FIGURA 4 apresenta a propagação de uma onda eletromagnética e como o raio eletromagnético é posicionado através do vetor  $r(\bar{s})$  como uma função da distância eletromagnética, a qual é medida pelas abscissas curvilíneas  $\bar{s}$ . O vetor unitário  $S_0$  tangente à curva  $\bar{s}$ , pode ser obtido a partir de:

$$s_o = \frac{dr}{d\bar{s}} \quad (2.13)$$

FIGURA 4 - DIREÇÃO DE UMA ONDA ELETROMAGNÉTICA



FONTE: Adaptado de Solimini (2016).

De acordo com Solimini (2016), considerando o gradiente do índice refração ( $\nabla n$ ) como uma equação diferencial, onde os parâmetros atmosféricos que o compõem variam de acordo a sua posição ao longo do percurso eletromagnético, tem-se que:

$$\frac{d(n_{s_0})}{d\bar{s}} = \nabla n \quad (2.14)$$

Onde o gradiente da refração é obtido a partir da derivada do vetor  $s_0$  no percurso ao longo de  $\bar{s}$ . Portanto, o gradiente pode ser reescrito como:

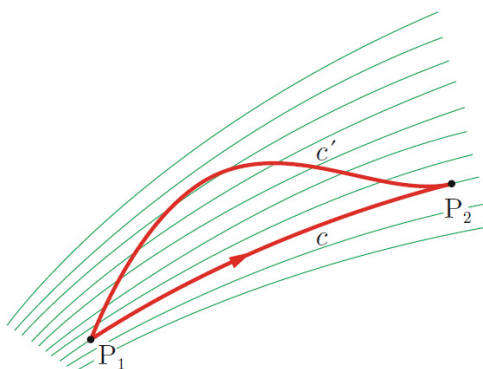
$$\frac{d}{d\bar{s}} \left[ n(r) \frac{dr}{d\bar{s}} \right] = \nabla n \quad (2.15)$$

O vetor posição ( $r$ ) (FIGURA 4) varre o percurso da onda a medida que aumenta o comprimento da distância percorrida pela energia eletromagnética. Qualquer ponto na curva a uma distância  $\bar{s}$ , desde a posição inicial  $P_s$ , pode ser obtido pela EQUAÇÃO 2.15. Neste contexto um comprimento entre duas posições ao longo do percurso  $s$  devido à radiação eletromagnética é chamado “*comprimento da trajetória eletromagnética*”, a qual pode ser obtido a partir de (SOLIMINI, 2016):

$$\bar{s} = \int_{P_1}^{P_2} n(r) ds \quad (2.16)$$

Onde o percurso de uma onda eletromagnética, entre os ponto  $P_1$  e  $P_2$  (FIGURA 5) tem um comprimento  $c'$  devido que  $n(r)$  é uma função que representa as mudanças geradas em diferentes posições pelo índice de refração. Na prática, o comprimento eletromagnético ( $\bar{s}_{c'}$ ) entre  $P_1$  e  $P_2$ , ao longo do segmento  $c'$  é maior que ( $\bar{s}_c$ ) ao longo de segmento  $c$  em uma magnitude diretamente relacionada ao valor do índice de refração (SOLIMINI, 2016).

FIGURA 5 - COMPRIMENTO ELETROMAGNÉTICO



FONTE: Adaptado de Solimini (2016)

### 2.2.2 Princípio de Fermat

O princípio de Fermat estabelece que em um meio de propagação de ondas eletromagnéticas, o tempo do percurso  $\Delta t$ , entre duas estações, é o mínimo (TORGE, 2001; MORITZ; HOFMANN-WELLENHOF, 1993; VANICEK;

KRAKIWSKY, 1986). Se o tempo de percurso  $\Delta t$ , é mínimo, significa que o gradiente da refração definido pela EQUAÇÃO 2.15 é zero. Geometricamente a linha reta entre duas estações atende a teoria de Fermat (FIGURA 6). A equação que define o princípio de Fermat é dada pela seguinte equação:

$$\Delta t = \int_{\text{percurso}} dt = \int_{\text{percurso}} \frac{ds}{v} = \min \quad (2.17)$$

A diferença que existe entre *comprimento da trajetória eletromagnética* ( $\bar{s}$ ) e a distância geométrica  $s$ , é uma área de interesse na área da Geodésia. Isto se deve a que a principal técnica de observação Geodésica presente nas atuais plataformas de observação (GNSS, EDM, VLBI, SLR, etc.) é baseada na determinação de distâncias por médio da radiação eletromagnética. Neste contexto o princípio de Fermat pode ser escrito em função do *comprimento da trajetória eletromagnética*  $\bar{s}$  e do índice de refração ( $n$ ) substituindo a EQUAÇÃO 2.3 na EQUAÇÃO 2.17 (TORGE, 2001) :

$$\Delta t = \frac{1}{c} \int_{\text{percurso}} n ds = \min \quad (2.18)$$

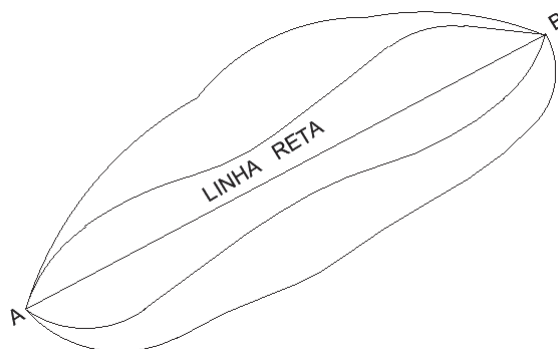
Fazendo:

$$n ds = \overline{ds} \quad (2.19)$$

A EQUAÇÃO 2.17 pode ser escrita como uma mínima condição para a distância eletromagnética (TORGE, 2001):

$$\bar{s} = \int_{\text{percurso}} \overline{ds} = \int_{\text{percurso}} n ds = \min \quad (2.20)$$

FIGURA 6 - PRINCIPIO DE FERMAT



FONTE: Adaptado de Vanicek e Krakiwsky (1986)

A resolução da EQUAÇÃO 2.20 precisa do conhecimento da variável  $n$  no percurso da onda eletromagnética, o qual representa o maior desafio na determinação de distâncias mediante radiação eletromagnética. Os efeitos da refração nas distâncias são quantificados pela diferença entre o percurso eletromagnético  $\bar{s}$  e a distância reta  $s$ :

$$\bar{s} - s = \int_{\text{percurso}} n \, ds - \int_0^s ds \quad (2.21)$$

Na EQUAÇÃO 2.21, o primeiro termo da esquerda representa a diferença do comprimento provocado pelo maior tempo de percurso da onda na atmosfera.

### 2.2.3 Coeficiente de refração

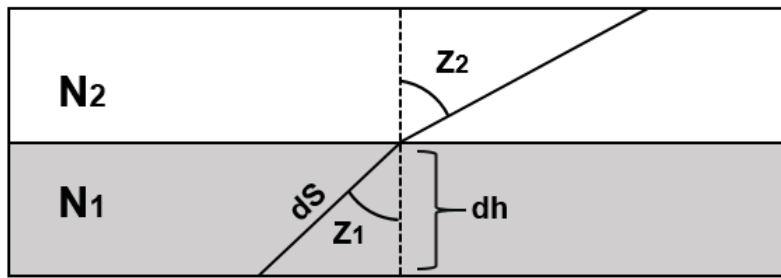
O efeito de curvatura que gera a refração pode ser calculado a partir da suposição de uma atmosfera estratificada de forma horizontal devido à variação do índice de refração com o aumento da altitude Brunner (1984). A lei de Snell (FIGURA 7) mostra como o raio eletromagnético passa pelas diferentes camadas da atmosfera. Neste sentido o coeficiente de refração em duas camadas da pode ser descrito mediante a seguintes equações:

$$N_1 \, \text{sen } z = \text{cte} \quad (2.22)$$

$$N_1 \, \text{sen } z_1 = N_2 \, \text{sen } z_2 \quad (2.23)$$



FIGURA 7 - LEI DE SNELL



FONTE: Adaptado de Vanicek e Krakiwsky (1986)

Assumindo que o ângulo, entre a normal e a superfície, é constante (FIGURA 8) e tangente ao raio com curvatura  $1/r$  e ao ângulo zenital ( $z$ ), (TORGE, 2001), a derivada da EQUAÇÃO 2.22 é:

$$\sin z \, dn + n \cos z \, dz = 0 \quad (2.24)$$

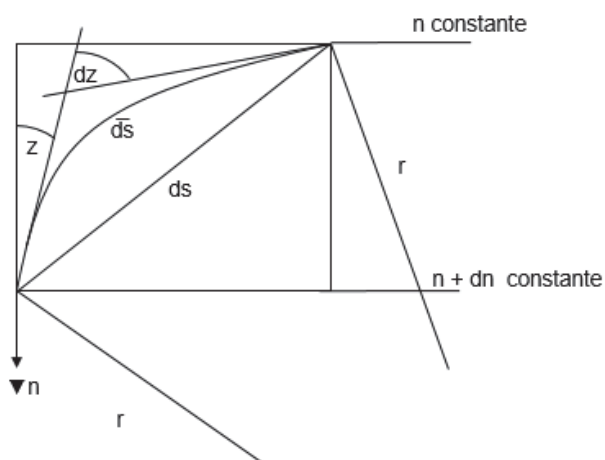
Com:

$$dn = (\text{grad } n) \cdot ds = |\text{grad } n| \cdot \cos z \, ds \quad (2.25)$$

A curva pode ser obtida da seguinte forma:

$$\frac{1}{r} = \frac{dz}{ds} = -\frac{|\text{grad } n|}{n} \sin z \quad (2.26)$$

FIGURA 8 - RAIOS CURVANDO-SE NA ATMOSFERA



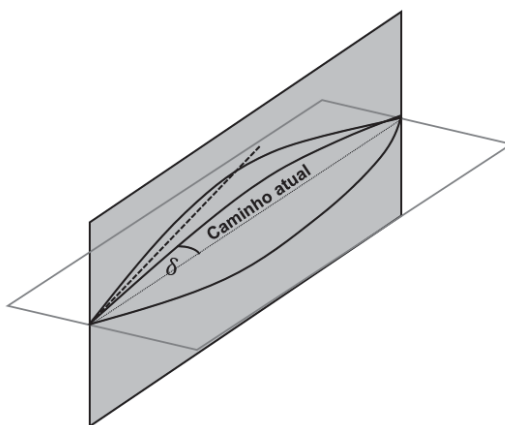
FONTE: Adaptado de Torge (2001)

Separando a componente horizontal e vertical do gradiente de  $n$ , é obtido o raio projetado em ambos planos (FIGURA 9). Os efeitos correspondentes aos ângulos horizontais e verticais são chamados refração horizontal ou lateral e refração vertical respectivamente.

Se a refração horizontal for desconsiderada, fazendo  $n$  aproximadamente igual a 1 e  $z$   $90^\circ$ , a refração vertical pode ser escrita como:

$$\frac{1}{r} = -\frac{dn}{dh} \quad (2.27)$$

FIGURA 9 - REFRAÇÃO HORIZONTAL E VERTICAL



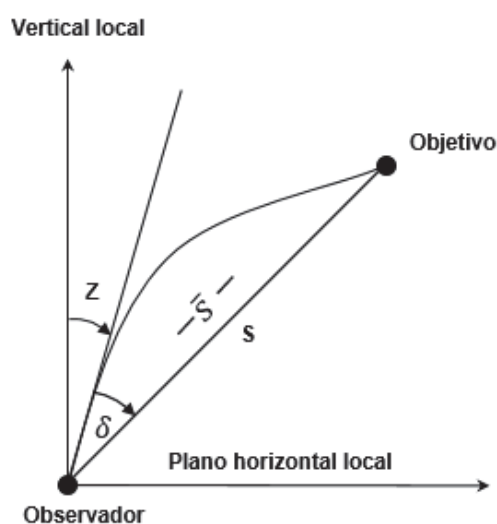
FONTE: Adaptado de Vanicek e Krakiwsky (1986)

A interpretação angular da refração é obtida a partir do coeficiente de refração ( $k$ ), o qual é definido como uma relação entre o rádio da Terra  $R$  e a curvatura do raio:

$$k = \frac{R}{r} = -R \frac{dn}{dh} \quad (2.28)$$

O ângulo  $\delta$  (FIGURA 9) é definido como o efeito da refração no ângulo zenital observado. O resultado do ângulo é obtido a partir da integração de  $1/r$  e  $dn/dh$  no percurso da onda (FIGURA 10).

FIGURA 10 - ÂNGULO DE REFRAÇÃO



FONTE: Adaptado de Torge (2001)

Para Torge (2001), o gradiente do lugar ( $\delta\eta$ ) é obtido a partir da distância desde a localização do observador. Portanto para um arco esférico com radio  $r$  constante e considerando as EQUAÇÕES 2.26 e 2.27, o ângulo pode ser obtido a partir de:

$$\delta = \frac{k}{2R} s \quad (2.29)$$

### 2.2.4 Grupo do índice de refração

No caso de medidores eletrônicos de distância, o índice de refração é calculado para ondas do espectro eletromagnético infravermelho e o laser visível, e em ambos casos é definida uma frequência media associada a uma faixa de frequências. As diferentes frequências da banda têm a mesma velocidade de propagação no vácuo, porém, no ar a velocidade muda devido à interferência provocada pelas diferentes frequências. Portanto o sinal resultante é soma de todas as frequências da banda, a qual é chamada “*Grupo de velocidade*” que sempre tem um valor menor de velocidade que suas frequências individuais (RÜEGER, 1990), a velocidade pode ser obtida a partir de:

$$c_g = c - \lambda \frac{dc}{d\lambda} \quad (2.30)$$

Onde:

$c_g$ : velocidade do grupo;

$c$ : velocidade da luz no meio;

$\lambda$ : comprimento da onda.

Chamando-se o grupo do índice de refração de  $n_g$ , da EQUAÇÃO 2.3 se obtém:

$$C_o = c_g n_g \quad (2.31)$$

Substituindo 2.30 e 2.3 em 2.31:

$$\frac{C_o}{n_g} = \frac{C_o}{n} - \frac{d(c_o/n)}{d\lambda} \lambda \quad (2.32)$$

Derivando respeito ao  $(C_o/n)$  e substituindo  $(n_g n/ C_o)$ :

$$n = n_g + \frac{n_g}{n} \frac{dn}{d\lambda} \lambda \quad (2.33)$$

Com  $(n_g/n) = 1$ , a EQUAÇÃO 2.33 pode ser reescrita como (RÜEGER, 1990):

$$n_g = n - \frac{dn}{d\lambda} \lambda \quad (2.34)$$

Onde:

$\lambda$ : o comprimento da onda no vácuo.

Na EQUAÇÃO 2.34  $n = f(\lambda)$  é conhecido, portanto o índice de refração pode ser obtido a partir da derivada desta equação (RÜEGER, 1990). De acordo com Barrell e Sears (1939) o índice de refração pode ser calculado a partir de:

$$N = (n - 1)10^6 = 287,6155 + \frac{1,62887}{\lambda^2} + \frac{0,01360}{\lambda^4} \quad (2.35)$$

Enquanto no caso do grupo do índice de refração:

$$N_g = (n_g - 1)10^6 = 287,6155 + \frac{4,88660}{\lambda^2} + \frac{0,06800}{\lambda^4} \quad (2.36)$$

As fórmulas 2.35 e 2.36 são validas para luz visível em ar seco com uma temperatura de 0°C, 1013,24 mb e 0,03% de CO<sub>2</sub>. Enquanto  $\lambda$  é o efetivo comprimento da onda no vácuo. A EQUAÇÃO 2.36 descreve o grupo do índice de refração com uma precisão de  $\pm 0,1$  ppm ou melhor (RÜEGER, 1990). Os valores do grupo do índice de refração foram obtidos a partir de experimentos com comprimentos de onda entre 436 e 644 nm. A modelagem foi adotada em 1963 na Assembléia Geral da União Internacional de Geodésia e Geofísica (IUGG) (RÜEGER, 1990).

Em condições ambientais o índice de refração pode ser obtido de acordo com a fórmula adotada pela IUGG em 1963 (RÜEGER, 1990):

$$n_L = 1 + \frac{n_g - 1}{1 + \alpha t_m} \cdot \frac{p}{1013,25} - \frac{4,125 \times 10^{-8}}{1 + \alpha t_m} e \quad (2.37)$$

Onde:

$n_L$ : grupo do índice de refração valido em condições ambientais;

$t_m$ : temperatura no ar (°C);

$p$ : pressão atmosférica (mb);

$\alpha$ : coeficiente de expansão do ar (-0,003661 per °C);

$e$ : pressão parcial do vapor de água (mb).

A equação 2.37 é uma simplificação da modelagem de interpolação proposta por Barrell e Sears (1939). Neste mesmo sentido Kohlrausch (1955) citado por Rüeger (1990), propõe uma modelagem trocando o coeficiente de expansão do ar:

$$(n_L - 1) = (n_g - 1) \frac{273,15 p}{(273,15 + t_m) 1013,25} - \frac{11,27 \times 10^{-6}}{(273,5 + t_m)} e \quad (2.38)$$

O erro do índice de refração devido à pressão, temperatura e umidade, pode ser obtido a partir da análise das derivadas parciais da equação 2.38 para uma temperatura de 15°C, pressão de 1007 mb, uma pressão de vapor de água de 13 mb e um grupo do índice de refração de 1,0003045 (RÜEGER, 1990):

$$dn_L \times 10^6 = -1.00 dt_m + 0.28 dp - 0.04 de \quad (2.39)$$

Onde:

$dn_L$ : derivada do grupo do índice de refração da luz;

$dt_m$ : derivada da temperatura;

$dp$ : derivada da pressão;

$de$ : derivada da pressão parcial de vapor de água.

Os erros gerados a partir da EQUAÇÃO 2.39 são:

- Um erro de 1°C na temperatura afeta ao índice de refração em 1ppm;
- Um erro de 1,0 mb na pressão afeta ao índice de refração em 0,3ppm;
- Um erro de 1 mb na umidade afeta ao índice de refração em 0,04 ppm.

### 2.2.5 Refração na atmosfera

Os parâmetros atmosféricos  $u$ ,  $t_m$  e  $p$ , estão fortemente ligados as mudanças na altitude, latitude, distribuição Terra/oceano, topografia, vegetação e condições locais e portanto geram variações no índice de refração, especificamente em condições locais turbulentas, as quais são encontradas geralmente na faixa de 10 até 30 metros acima da superfície (TORGE 2001). Os valores dos parâmetros atmosféricos podem ser obtidos a partir da análise de um dos gradientes verticais.

#### 2.2.5.1.1 Temperatura

A temperatura diminui segundo a EQUAÇÃO 2.40. Além disto, suas variações são maiores devido principalmente aos processos de inversão durante a noite e convecção no meio dia (TORGE , 2001).

$$dt_m / dh = -0.0065^\circ C / m \quad (2.40)$$

#### 2.2.5.1.2 Pressão

A pressão diminui exponencialmente com o incremento da altitude segundo a EQUAÇÃO 2.41. Esta diminuição tem a característica de um equilíbrio hidrostático, ou seja, a pressão depende da densidade  $\rho$  e da gravidade  $g$  (TORGE, 2001):

$$dp / dh = -\rho g = -0.034 \frac{p}{t_m} = -0.12 hPa / m \quad (2.41)$$

A EQUAÇÃO 2.40 é válida para condições atmosféricas ideais ( $t_m=14,85^\circ C$ ,  $p=1013$  hPa) (TORGE, 2001).

### 2.2.5.1.3 Umidade

A umidade na troposfera é irregular e está concentrada em uma capa de poucos quilômetros acima da superfície física da Terra. Sua obtenção é através da pressão de vapor de água e geralmente tem gradiente menor que a pressão e a temperatura, seu valor médio é:

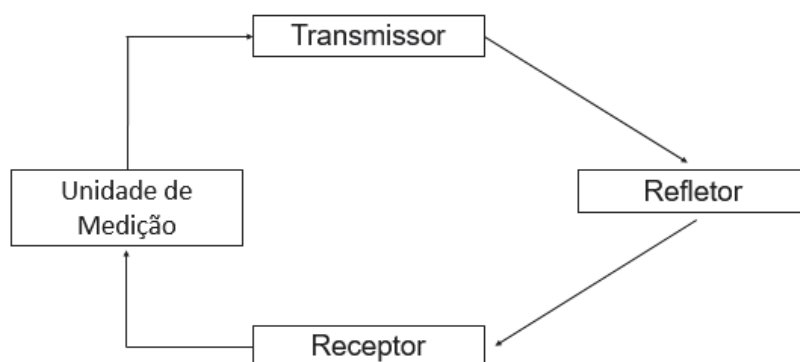
$$de / dh = -0.0035h \text{ Pa} / m \quad (2.42)$$

## 2.3 MEDIDA ELETRÔNICA DA DISTÂNCIA (MED)

### 2.3.1 Princípios

O princípio de funcionamento dos distanciômetros eletrônicos é baseado na presença de uma unidade de medição que é composta por um transmissor e um receptor (FIGURA 11). Em um extremo da linha observada o transmissor emite uma onda eletromagnética, em uma determinada frequência, com velocidade constante, a qual é refletida no outro extremo, sendo finalmente recebida novamente na unidade de medida pelo receptor (DEUMLICH, 1982).

FIGURA 11 - PRINCIPIO DE FUNCIONAMENTO DE EDM



FONTE: Adaptado de Deumlich (1982)

Reescrevendo na EQUAÇÃO 2.2, a distância entre duas estações é definida como:



$$d' = \frac{c\Delta t'}{2} \quad (2.43)$$

Onde:

$d'$ : Distância entre uma estação e um alvo;

$\Delta t'$ : tempo de propagação desde uma estação até um alvo;

$c$ : Velocidade de uma onda eletromagnética em um meio, normalmente é definida como a velocidade da luz no meio.

Segundo Rüeger (1990) existem muitas formas de medir distâncias pelos meios eletrônicos. No caso dos instrumentos eletro-ópticos, são usados os métodos de pulso e diferença da fase.

### 2.3.2 Método de Pulso

Neste método o instrumento envia uma série de pulsos eletromagnéticos, os quais são refletidos no alvo e voltam ao instrumento. De acordo com a EQUAÇÃO 2.2, precisa-se obter o tempo de percurso da onda, chamado tempo de propagação “*time of flight*”. Este é obtido a partir de um oscilador eletrônico que funciona como um dispositivo de sincronização entre o início e o final da transmissão do pulso (quando o pulso volta ao instrumento). O oscilador funciona como um dispositivo eletrônico acoplado a um contador de alta velocidade (UREN; PRICE, 2010). O sinal de partida abre uma conexão entre o oscilador e o contador de alta velocidade que é fechado pelo pulso de retorno (FIGURA 12). A formulação matemática do método de pulso é:

$$2d = c\Delta t \quad (2.44)$$

Com:

$$2d = c(t_R - t_E) \quad (2.45)$$

Onde:

$d$ : distância entre o instrumento e o alvo;

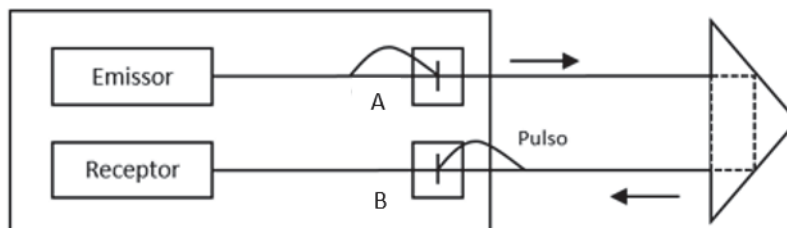
$c$ : velocidade da luz em um meio;

$\Delta t$ : tempo de propagação do pulso;

$t_E$ : tempo de saída do pulso desde a porta A instante da emissão

$t_R$ : tempo de retorno do pulso à porta B; instante do retorno.

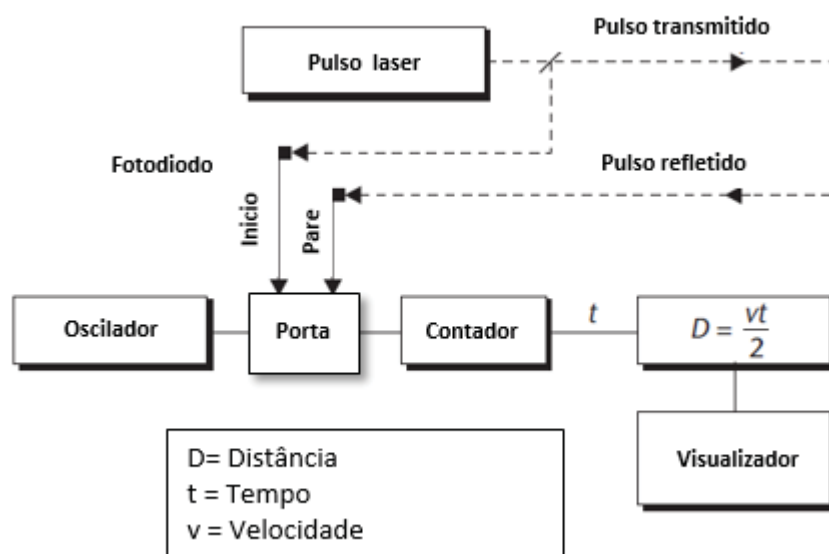
FIGURA 12 - MÉTODO DE PULSO NA TECNOLOGIA MED



FONTE: Adaptado de Rüeger (1990)

O diagrama de funcionamento de um distanciômetro pelo método do pulso é amostrado na FIGURA 13.

FIGURA 13 - DIAGRAMA DE FUNCIONAMENTO DO MÉTODO DE PULSO EDM



FONTE: Adaptado de Uren e Price (2010)

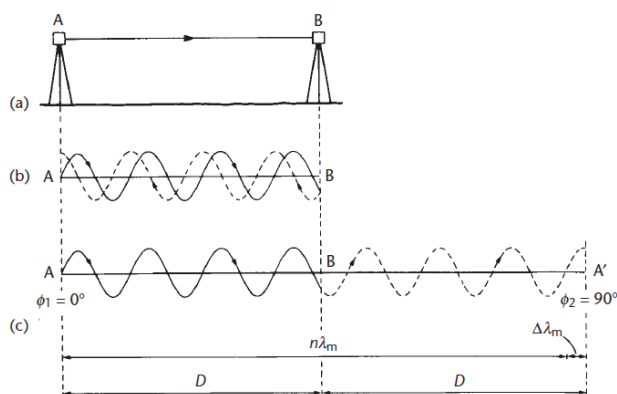
Neste diagrama é apresentada a configuração básica de um distanciômetro baseado na técnica do pulso. A energia eletromagnética transportada em ondas é emitida pelo transmissor e refletida em direção à porta integrada no distanciômetro eletrônico, o qual usando o oscilador determina o tempo de percurso da onda. Finalmente segundo a EQUAÇÃO

2.45 é obtida a distância entre duas estações (RÜEGER, 1990; UREN; PRICE, 2010).

### 2.3.3 Método de fase

Este método está baseado na determinação da diferença da fase do sinal emitido e do sinal refletido. A maior parte dos instrumentos MED são baseados neste princípio. A FIGURA 14 mostra o sinal modulado na onda portadora do emissor e a comparação da fase quando este é refletido.

FIGURA 14 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO MED PARA DIFERENÇA DA FASE



FONTE: Uren e Price (2010)

Matematicamente o sinal emitido pode ser escrito como:

$$Y_E = A \sin(\omega t) \quad (2.46)$$

$$Y_E = A \sin(\phi) \quad (2.47)$$

Onde:

$Y_E$  = componente trigonométrica da sinal emitida na componente Y

Enquanto o sinal recebido:

$$Y_R = A \sin(\omega(t + \Delta t)) \quad (2.48)$$

$$Y_R = A \sin(\phi + \Delta\Phi) \quad (2.49)$$

Onde:

$Y_R$  = componente trigonométrica da sinal recebida na componente Y

A distância pode ser obtida a partir da EQUAÇÃO 2.43, porém, na técnica da diferença da fase o tempo de propagação  $\Delta t'$  não é possível de se obter, em seu lugar é calculado a defasagem do sinal  $\Delta t$ , que corresponde à quantidade de ciclos completos gerados mais uma porção deles no tempo de propagação do sinal. A relação entre o tempo de atraso e o tempo de propagação é dada pela seguinte equação:

$$\Delta t' = mt^* + \Delta t \quad (2.50)$$

Onde:

$\Delta t'$ : tempo de propagação de um sinal específico;

$m$ : número inteiro de ciclos no percurso (ambiguidades);

$t^*$ : tempo decorrido para um ciclo completo do sinal de modulação (período);

$\Delta t$ : tempo de atraso da fase medida.

Na EQUAÇÃO 2.50 todos os parâmetros são conhecidos exceto o tempo de propagação  $\Delta t'$ . No caso do tempo de atraso, este pode ser obtido como uma função da diferença da fase  $\Delta \Phi$ , mediante a seguinte equação:

$$\Delta t = \frac{\Delta \phi \lambda}{2\pi c} \quad (2.51)$$

Onde  $\lambda$  é a modulação do comprimento da onda. Enquanto o tempo do intervalo de um ciclo na modulação do comprimento (período) pode ser obtido a partir de:

$$t^* = \frac{\lambda}{c} \quad (2.52)$$

Rescrevendo a EQUAÇÃO 2.50 em função da EQUAÇÃO 2.51:

$$\begin{aligned} d &= \frac{c}{2} (mt^* + \Delta t) \\ &= \frac{c}{2} \left( m \frac{\lambda}{c} + \frac{\Delta \phi \lambda}{2\pi c} \right) \end{aligned}$$

$$= m \frac{\lambda}{2} + \frac{\Delta\phi}{2\pi} \frac{\lambda}{2} \quad (2.53)$$

O termo  $\lambda/2$  geralmente é substituído por  $U$ , o qual é definido como o comprimento da unidade de um instrumento MED, ou seja, a escala com que o instrumento mede as distâncias:

$$U = \frac{\lambda}{2} \quad (2.54)$$

O segundo termo da EQUAÇÃO 2.53 é substituído por um novo termo  $L$ , indicando uma fração de  $U$ :

$$L = \frac{\lambda}{2} \frac{\Delta\phi}{2\pi} = \frac{\Delta\phi}{2\pi} U \quad (2.55)$$

Onde:

$L$ : fração da unidade de  $U$ ;

$\Delta\phi$ : diferença da fase;

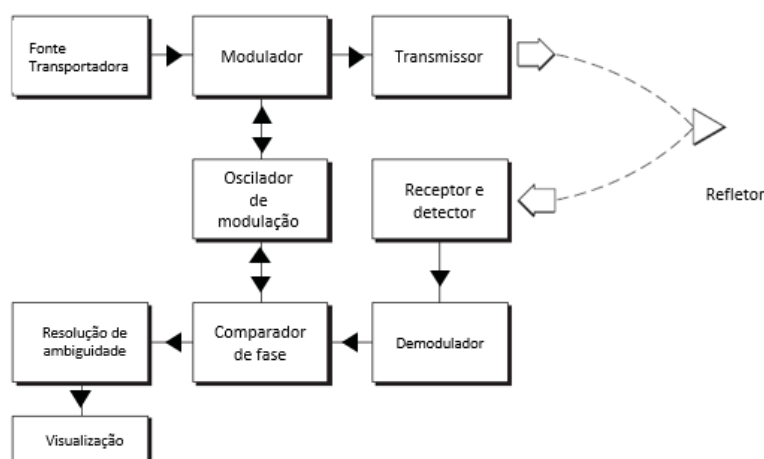
$U$ : escala com que o instrumento mede as distâncias.

A equação fundamental pode ser escrita é:

$$d = mU + L \quad (2.56)$$

A FIGURA 15 apresenta o diagrama de funcionamento de um medidor de distância eletrônica, mediante a técnica de diferença de fase.

FIGURA 15 - DIAGRAMA DE FUNCIONAMENTO DO MÉTODO DA FASE



FONTE: Adaptado de Uren e Price (2010)

## 2.4 CORREÇÕES ATMOSFÉRICAS APLICADAS À MED

### 2.4.1 Correções de velocidade

A fórmula básica para a obtenção da distância, entre duas estações, a partir de instrumentos MED foi apresentada NA EQUAÇÃO 2.43. O valor da velocidade de propagação da onda em um médio ( $c$ ) pode ser substituído pela velocidade da luz no vácuo e o índice de refração de referência (RÜEGER, 1990):

$$d' = \frac{c_o}{n_{ref}} \frac{\Delta t'}{2} \quad (2.57)$$

Onde

$d'$ : distância medida com o instrumento;

$c_o$ : velocidade da luz no vácuo;

$\Delta t'$  = tempo de propagação do sinal no caminho instrumento- refletor- instrumento;

$n_{REF}$  = índice de refração de referência no instrumento.

### 2.4.1.1 Índice de refração de referência

O índice de refração de referência é específico para cada instrumento. Este é definido para a leitura teórica considerada como correta de um instrumento MED (RÜEGGER, 1990). O índice pode ser obtido a partir de:

$$n_{REF} = \frac{c_o}{\lambda_{MOD} f_{MOD}} \quad (2.58)$$

$$n_{REF} = \frac{c_o}{2U f_{MOD}} \quad (2.59)$$

Onde:

$\lambda_{MOD}$ : constante da modulação do comprimento da onda do instrumento;

$f_{MOD}$ : constante da modulação da frequência;

$U$ :  $\lambda_{MOD}/2$ , chamada comprimento da unidade do instrumento.

O índice de refração de referência de um instrumento é fixado considerando um comprimento de onda adequado e ajustando o oscilador principal com uma tolerância média no valor da refração para condições ambientais padrão com respeito ao instrumento empregado (RÜEGGER, 1990).

### 2.4.1.2 Primeira correção de velocidade (K')

A primeira correção de velocidade (K'), corrige as distâncias obtidas com relação ao índice de refração (RÜEGGER, 1990). Muitas vezes a primeira correção de velocidade no espectro infravermelho ou luz visível considera só medições da temperatura e pressão na obtenção do índice, a umidade é fixada ou não considerada devido ao fato de não provocar variações significativas no índice de refração (SCHOFIELD; BREACH, 2007). Porém, para distâncias que precisem de uma alta precisão, Rüeger (1990) recomenda uma modelagem completa considerando todos os parâmetros atmosféricos (pressão, temperatura e umidade). De acordo com o princípio apresentado pela EQUAÇÃO 2.57 é possível obter a correção a partir de:

$$d = \frac{c_o}{n} \frac{\Delta t}{2} \quad (2.60)$$

Onde  $n$  é o índice de refração no instante da observação MED, (idealmente o valor médio em relação aos extremos da linha medida) (RÜEGER, 1990). Com o objetivo de obter o comprimento corrigido a EQUAÇÃO 2.60 pode ser escrita como:

$$\frac{c_o \Delta t}{2} = n_{REF} d' \quad (2.61)$$

Substituindo 2.61 em 2.57 se tem que:

$$d = \left( \frac{n_{REF}}{n} \right) d' \quad (2.62)$$

Para Rüeger (1990) é preferível trabalhar com a equação de diferenças, portanto a primeira correção da velocidade ( $K'$ ) pode ser obtida a partir da diferença entre a EQUAÇÃO 2.61 e 2.57:

$$\begin{aligned} K' &= d - d' = c_o \frac{\Delta t'}{2} \left( \frac{1}{n} - \frac{1}{n_{REF}} \right) \\ K' &= c_o \frac{\Delta t'}{2} \left( \frac{n_{REF} - n}{n \cdot n_{REF}} \right) \\ K' &= c_o \frac{\Delta t'}{2n_{REF}} \left( \frac{n_{REF} - n}{n} \right) \end{aligned} \quad (2.63)$$

Substituindo na EQUAÇÃO 2.60 é obtida a primeira correção de velocidade:

$$K' = \left( \frac{n_{REF} - n}{n} \right) d' \quad (2.64)$$

Geralmente o valor do denominador na EQUAÇÃO 2.64 é considerado  $n=1$ . Para Rüeger (1990) está simplificação não ocasiona um erro que exceda



0,02 ppm. Portanto a correção da primeira velocidade ( $K'$ ), pode ser obtida a partir de:

$$K' = d'(n_{REF} - n) \quad (2.65)$$

Finalmente a distância corrigida pela primeira velocidade é:

$$d = d' + d'(n_{REF} - n) \quad (2.66)$$

$$d = d' + K' \quad (2.67)$$

Para instrumentos eletro-ópticos a primeira correção de velocidade é aplicada segundo a EQUAÇÃO 2.68. Nesta são considerados os valores atmosféricos de pressão, temperatura e umidade definidos por Rüeger (1990) para o grupo de índice de refração. A correção da primeira velocidade é dada por:

$$K' = \left[ C - \frac{Dp}{(273.15 + t)} + \frac{11.27e}{(273.15 + t)} \right] 10^{-6} d' \quad (2.68)$$

Onde os coeficientes C e D são:

$$C = (n_{REF} - 1)10^6 = N_{REF} \quad (2.69)$$

$$D = (n_g - 1)10^6 \frac{273.15}{1013.25} = \frac{273.15}{1013.25} N_g \quad (2.70)$$

Onde:

$N_g$ : Grupo do índice de refração;

$N_{REF}$ : Índice de refração de referência.

Para Rüeger (1990) os valores do índice refração em condições ambientais devem ser determinados nos extremos da linha observada, portanto, a primeira correção de velocidade pode ser escrita como:

$$K' = \frac{1}{2} (K_1 + K_2) \quad (2.71)$$

Onde:

$K_1$ : correção da primeira velocidade no ponto 1;

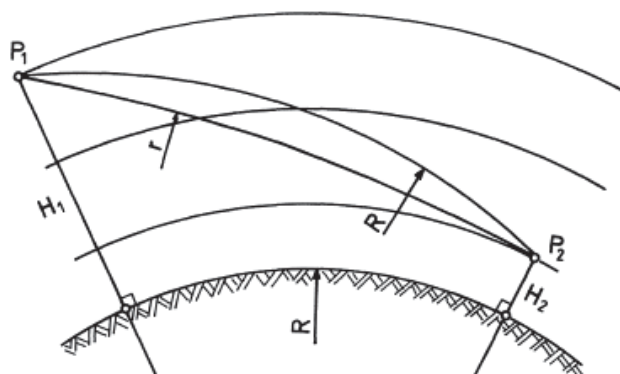
$K_2$ : correção da primeira velocidade no ponto 2.

#### 2.4.1.3 Segunda correção de velocidade ( $K''$ )

A determinação da correção da primeira velocidade (EQUAÇÃO 2.67), implica indiretamente o cálculo do índice de refração nos extremos da linha medida (RÜEGER, 1990). A estratificação esférica da atmosfera (FIGURA 16) provoca um erro  $\Delta n$  que abordado pela segunda correção de velocidade. Esta correção pode ser obtida a partir de:

$$n = \frac{n_1 + n_2}{2} + \Delta n \quad (2.72)$$

FIGURA 16 - SEGUNDA CORREÇÃO DE VELOCIDADE – COEFICIENTE DE REFRAÇÃO



FONTE: Rüeger (1990)

Onde  $\Delta n$  é a diferença entre o índice refração entre uma curva de rádio  $R$  (ideal) e a curva de raio  $r$ , onde  $H_1$  e  $H_2$  são altura de dois sinais. Assumindo a estratificação esférica da atmosfera (FIGURA 16). O valor de  $\Delta n$  pode ser obtido pela seguinte equação (RÜEGER, 1990):

$$\Delta n = (k - k^2) \frac{d^2}{12R^2} \quad (2.73)$$

Onde:

$k$ : coeficiente de refração;

$d'$ : distância eletrônica;

$R$ : raio médio de curvatura ao longo da linha (geralmente é empregado o valor 6370 km).

Na EQUAÇÃO 2.73 o coeficiente de refração pode ser obtido da EQUAÇÃO 2.29 considerando  $r = 8R$ , com  $R$  o raio médio da Terra (6370 km). Geralmente o valor de  $k$  para o espectro eletromagnético infravermelho e luz visível é 0,13 (RÜEGER, 1990).

Portanto a segunda correção de velocidade  $K''$  é dada por:

$$K'' = -d' \Delta n \quad (2.74)$$

Ou

$$K'' = -\left(k - k^2\right) \frac{d'^3}{12R^2} \quad (2.75)$$

Finalmente a distância corrigida pela primeira e segunda velocidade é:

$$d_1 = d' + K' + K'' \quad (2.76)$$

#### 2.4.2 Modelos de correção baseados na turbulência atmosférica

Os estudo acerca da refração e a modelagem dos parâmetros atmosféricos empregando-se distanciômetros eletrônicos atendem diferentes necessidades relacionadas a atividades da Geodesia. Uma aproximação foi feita considerando modelos baseados na turbulência atmosférica, os quais analisam gradientes verticais de temperatura e realizam interpolações de parâmetros atmosféricos ao longo de uma observação de distância obtida pela técnica distanciometria eletrônica. Neste contexto Brunner e Fraser (1977) apresentam o modelo turbulento de transferência (TTM) para ondas eletromagnéticas do espectro visível e micro-ondas. Baseado na mesma teoria

Angus-Leppan e Brunner (1980) desenvolveram o Modelo atmosférico de temperatura para comprimentos curtos (STREAM), o qual analisa além do gradiente vertical de temperatura, diferenças entre o índice de refração teórico e calculado para observações de distâncias de até 3 quilômetros. Outro modelo baseado na teoria do gradiente vertical de temperatura é o modelo atmosférico simples de duas camadas (STAM) desenvolvido por Fraser (1981). Neste, procura-se diminuir a medição de parâmetros adicionais necessários no modelo STAM e TTM como a velocidade do vento no extremos da linha visada.

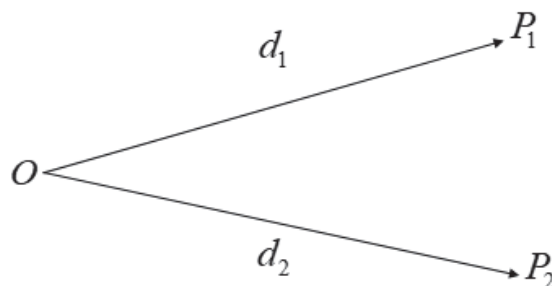
#### 2.4.3 Método da linha de referência

A correção de distâncias MED pelo método da linha de referência foi desenvolvida por Robertson (1977a). Com base nos resultados obtidos das campanhas de monitoramento da barragem de Oahe, no rio Missouri no sul de Dakota, USA, entre os meses de junho de 1973, outubro de 1973 e maio de 1974. Robertson postulou que o erro provocado pelo índice de refração nas distâncias tem a mesma magnitude num curto intervalo do tempo. Esta característica só é válida nas seguintes condições:

1. De uma posição são observadas duas linhas ao mesmo tempo, as quais tem uma proporção constante entre seus comprimentos;
2. Os comprimentos medidos de uma mesma estação contêm o mesmo erro;
3. “*Ao mesmo tempo*” considera intervalos de tempo de 30 minutos.

Os efeitos atmosféricos neste método não são considerados, portanto a correção da primeira velocidade não é feita. Na FIGURA 17, são observadas distâncias em duas direções ( $d1$  e  $d2$ ), a relação  $d1/d2 = k$ , é chamada a proporção dos comprimentos.

FIGURA 17 – MÉTODO DA LINHA DE REFERENCIA



FONTE: US Army Corps (1977) e Robertson (1977a)

As diferenças nos parâmetros atmosféricos temperatura ( $\Delta T$ ), pressão ( $\Delta p$ ) e umidade ( $\Delta e$ ), ao longo dos comprimentos  $d_1$  e  $d_2$ , são avaliadas seguindo a propagação de erro no índice de refração proposta por Rüeger (1990). De esta forma:

- $\Delta T$  entre  $O-d_1$  e  $O-d_2$  é  $4^\circ\text{C}$ , e gerada uma incerteza em distância de 4 ppm;
- $\Delta p$  entre  $O-d_1$  e  $O-d_2$  é 4 mb, e gerada uma incerteza em distância de 1,2 ppm;
- $\Delta e$  entre  $O-d_1$  e  $O-d_2$  é 4mb, e gerada uma incerteza em distância de 0,16ppm.

Considerando as diferenças nos parâmetros atmosféricos, a incerteza das distâncias nas direções de  $P_1$  e  $P_2$  são:

$$P_1 = d_1 + 4\text{ppm} + 1.2\text{ppm} + 0.16\text{ppm}$$

$$P_2 = d_2 + 4\text{ppm} + 1.2\text{ppm} + 0.16\text{ppm}$$

Portanto, a proporção  $d_1/d_2 = k$ , é constante num intervalo de tempo. Finalmente as distâncias corrigidas são obtidas da multiplicação do fator  $k$  por cada uma das distâncias envolvidas neste método:

$$\begin{aligned}d_{1c} &= d_1 \cdot k \\d_{2c} &= d_1 \cdot k_2\end{aligned}\tag{2.77}$$

## 2.5 AUTOMAÇÃO NA GEODÉSIA

Desde sua origem, os seres humanos desenvolveram diferentes ferramentas para auxiliar em suas atividades cotidianas. Originalmente seus produtos eram construídos para objetivos particulares e não eram produzidos em grandes quantidades. Com o tempo surgiu o conceito de produção em série, mas ainda a fabricação era feita por artesãos qualificados. Com a revolução industrial a produção passa a ser realizada em grandes escalas, devido principalmente à integração da energia elétrica nas linhas de fabricação. Neste período o conceito de automação começa a ser explorado (LAMB, 2013).

O termo automação foi definido por D.S. Harder da firma General Motors em 1936 para explicar o funcionamento de sistemas de transferência que transportam partes de uma máquina para outra em uma linha de produção integrada (BADIRU; OMITAOMU, 2010). Outros autores definem automação como o uso de comandos de programação lógica e instrumentos mecanizados para substituir a tomada de decisões por parte de seres humanos (LAMB, 2013). Para Groover (2007, p.3) *“a automação é uma tecnologia na qual um processo ou procedimento é realizado por meio de instruções programadas geralmente combinadas com o controle automático de feedback para garantir a execução adequada das instruções”*. Um ponto em comum para a maior parte das definições é a diminuição na interação do operador com um sistema de produção.

O desenvolvimento tecnológico na área da instrumentação Geodésica fornece plataformas de observação mais elaboradas e complexas em seu projeto, além de ter altos níveis de automação em seu funcionamento, isto torna possível observáveis mais acuradas em um menor tempo de aquisição, permitindo que tanto os dados obtidos como as soluções e produtos sejam de uma melhor qualidade. O impacto gerado pelo desenvolvimento tecnológico é transversal à técnica empregada, um exemplo é o caso do desenvolvimento da Geodésia espacial, as técnicas de VLBI, SLR, LLR, DORIS, GNSS, onde é

possível um posicionamento preciso juntamente com uma integração de nível mundial, sendo isto possível graças ao alto nível de automação das plataformas. Na engenharia o desenvolvimento tecnológico permitiu desenvolvimento de equipamentos como estações totais robóticas, níveis digitais e do GNSS, que permitem uma relação diretamente proporcional entre eficiência e acurácia. Para o caso de levantamentos Geodésicos ou Topográficos Terrestres, obtidos por observações de distâncias e direções, os avanços tecnológicos no projeto de estações totais, possíveis principalmente pela evolução da eletrônica, permitem substituir os sistemas mecânicos por componentes microeletrônicos. Um exemplo são os codificadores angulares, os quais fornecem uma alta resolução angular, enquanto a medida eletrônica de distâncias permite observações de distâncias com acurácias de milímetros. É importante mencionar também os avanços nos *softwares* para processamento dos dados coletados em campo. No princípio a coleta e processamento eram etapas muito bem separadas, executadas cada uma em seu tempo. A incorporação de programas de processamento diretamente na memória dos equipamentos permitiu que todo o trabalho fosse conduzido de forma conjunta, quase que eliminando esta separação, isto é uma tendência que deve aumentar nos próximos anos, em decorrência do barateamento dos sensores e sua diminuição de tamanho, conjugado com o aumento da capacidade de processamento. Também não se deve esquecer a necessidade de compatibilização do uso de dispositivos móveis em conjunto com os equipamentos de mensuração, o que caracterizará um campo de desenvolvimento de novas tecnologias.

O conceito de automação nas estações totais pode ser abordado de duas formas: a primeira considera a tecnologia presente nos componentes eletrônicos. Como exemplo tem-se os sistemas servo-assistidos que permitem automatizar a observação de direções mediante rotinas programáveis para a rotação de seus codificadores angulares ou os sistemas de reconhecimento de automático de alvos, os quais permitem realizar de forma automática a pontaria em um refletor mediante o reconhecimento de uma assinatura digital gerada pela intensidade da refletividade do objetivo. Esta primeira etapa está relacionada com a capacidade de automação interna (*hardware*) dos elementos que compõem uma estação total. Enquanto a segunda etapa

compreende os fluxos de trabalho fornecidos pelo *software* integrado no microcomputador de uma estação total, neste caso a automação é abordada do ponto de vista sobre como o usuário pode empregar a tecnologia integrada. Um exemplo são as rotinas que permitem a observação de malhas de pontos de forma automática, sem a necessidade de que operador faça a medição manual ponto por ponto. Neste caso podem ser definidos critérios como intervalos de observação, definidos através da distância entre dois pontos consecutivos ou um ângulo de deslocamento, por exemplo.

Em ambas etapas o conceito de automação, procura-se uma diminuição na intervenção com o instrumento por parte do operador o que supõe um aumento na eficiência e uma diminuição nos erros aleatórios. Porém é necessário ainda que o operador tenha uma etapa de configuração de parâmetros, o que leva a uma especialização deste operador comparado com um processo tradicional, onde agora são necessários conhecimentos são só da metodologia de coleta empregada, mas por vezes de temas relacionados à desenho assistido por computador, processo de tomada de decisão, do próprio conceito de automação e de uma nova forma de pensar a coleta de dados em campo.

Uma das atividades da Geodésia é o monitoramento de estruturas antrópicas ou elementos naturais, como taludes ou mesmo placas tectônicas. Em diferentes escalas e com diferentes objetivos, o monitoramento demanda de um grande volume de dados e alta acurácia. Neste contexto, a automação no monitoramento de estruturas permite configurar diferentes cenários para a coleta e processamento das observações de campo para obter as informações sobre o elemento monitorado. No caso do monitoramento GNSS nos trabalhos desenvolvidos por Barzaghi et al. (2018), Ince e Sahin (2000) e Seung-woo et al. (2015) mostram o monitoramento de diferentes estruturas, onde uma das características no processo é a automação deste. No mesmo contexto a automação no uso de estações totais para monitoramento e levantamentos topográficos foi apresentado nas pesquisas de Veiga (2000) Lutes (2002), Gairns (2008), Yavaşoğlu et al. (2018), Chang e Qunge (2009), Nadal (2008) e Da Cruz (2015).

Uma das características da automação nas plataformas de observação Geodésicas, é o desenvolvimento de *software* e integração de hardware por



parte do usuário. Isto é possível pela abertura por parte dos fabricantes de instrumentos Geodésicos de sistemas de comunicação e códigos de controle em diferentes linguagens de programação.

### 2.5.1 Interfaces

Quando um *software* é criado para ser usado em conjunto com um equipamento de medida, é necessário entender o conceito de interface, ou seja como dois sistemas diferentes (computador / equipamento de medição) interagem e como este sistema interage com o usuário. Assim é possível definir três classes de interface: hardware, usuário e interface de *software* (VEIGA, 2000).

A primeiro permite estabelecer uma conexão perfeita entre o computador e o equipamento de medição. A interface do usuário aborda a maneira pela qual o usuário irá interagir com o sistema desenvolvido. Decodificar dados recebidos e obter meios para enviar comandos ao equipamento corresponde à interface de software.

A interface de hardware trata da conexão física entre as unidades. Envolve a forma de conexão entre os sistemas, bem como o método de transmissão de dados. Normalmente a conexão entre um equipamento de o dispositivo computacional (um laptop ou smartphone, por exemplo) pode ser realizada através de cabos ou através de comunicação sem fio, como Bluetooth ou outros sistemas de rádio.

A interface do usuário deve prever a maneira como os usuários podem interagir com o sistema (instrumento / computador / programa) e como os resultados dessa interação são apresentados. Deve ser levado em conta as diferenças entre os usuários e suas necessidades específicas.

Enquanto a interface de *hardware* permite que dois sistemas "interajam" fisicamente, é necessário também garantir que eles entendam o que ambos estão dizendo. Aqui começa a interface do *software* (ou programação). É importante neste caso conhecer o chamado protocolo de dados de cada equipamento.

Um protocolo é uma descrição formal de formatos dados, variáveis, mensagens e comandos. Inclui regras que podem permitir a troca de

informações entre o instrumento de medição e o computador. O modelo de protocolo mais simples seria a especificação de como as observações são armazenadas em um instrumento (o formato de dados de cada equipamento). No caso das estações totais, para fins didáticos utilizando estações totais, um protocolo pode definir formatos de padrões para cada tipo de dado (VEIGA, 2000):

- Dados de observação;
- Dados de controle ou operação;
- Dados de configuração;
- Dados de simulação.

Ainda segundo o autor, o detalhamento específico de cada um dos quatro grupos de dados referidos e apresentado a seguir:

- Dados de observação: são os valores medidos ou observados (como direções horizontais, ângulos verticais e distâncias), bem como os valores estimados a partir dos mesmos, um desnível por exemplo;
- Dados de controle ou operação: são dados utilizados como instruções para que o equipamento execute uma determinada tarefa, como medir a distância ou verificar a inclinação do eixo;
- Dados de Configuração: através destes dados, é possível definir parâmetros internos do equipamento, como altura do instrumento, formato de distâncias e ângulos, etc;
- Dados de simulação: esses dados permitem que uma tecla específica do equipamento seja emulada. Com este tipo de dados, é possível elaborar um teclado virtual que simula o teclado do instrumento, permitindo a operação diretamente na tela do computador.

Com a introdução de estações totais robóticas, os dados de controle e operação podem ser subdivididos em dois conjuntos:

- Medição: Está relacionado com a medição de uma quantidade, como direções ou distâncias;
- Movimento: Refere-se ao desempenho dos movimentos do instrumento, como a inclinação do telescópio ou a busca de um alvo.

Geralmente para cada protocolo, um grupo de dados é definido. É representado por uma sequência de caracteres no formato ASCII.

Alguns exemplos de protocolos são o GeoCOM e GSI - Geo Serial Interface da *Leica*; e o M5, R4, R5 e Rec500, Trimble Access SDK da Zeiss / Trimble. O GeoCom será descrito com mais detalhes adiante. Durante o desenvolvimento de aplicações com base nestes protocolos, é importante verificar o caso específico de cada instrumento, para determinar as potencialidades de implementação possíveis.

Em paralelo, o conceito de hardware livre fornece placas eletrônicas programáveis que permitem a integrações entre diferentes instrumentos, associando também o uso de algum tipo de protocolo. Neste contexto Hauk, Hirt e Ackermann (2017) desenvolveram o sistema *QDaedalus*, o qual permite avaliar a deflexão da vertical mediante a integração de uma estação total *Leica* e uma câmara digital. Zou et al. (2017) integraram diferentes sensores para o desenvolvimento do “*Sistema de nivelamento trigonométrico preciso móvel baseado em veículo terrestre: um método alternativo para nivelamento preciso*”, Omidalizarandi, Paffenholz e Neumann (2018) propuseram um sistema de reconhecimento automático de objetivos passivos; Gikas e Daskalakis (2008) desenvolveram um sistema de aquisição de dados para extração da geometria de vias ferroviárias. No caso do monitoramento Geodésico, existem diversos sistemas automatizados, como o GOCA da *Universidade de Tecnologia de Karlsruhe*, que integra observações GNSS e de estação totais (JÄGER; SPOHN, 1999), o DIMONS da *Universidade de New Brunswick* (LUTES et al, 2001), o ALERT do Centro Canadense de Engenharia Geodésica e Universidade de *New Brunswick* (WILKINS; BASTIN; CHRZANOWSKI, 2003), DABAMOS da Universidade de *Neubrandenburg de Ciências Aplicadas* (ENGEL; SCHWEIMLER, 2016). Estes são exemplos de sistemas desenvolvidos por usuários para o monitoramento Geodésico.

A automação da coleta de dados atmosféricos para correções de primeira velocidade foi abordada por Solariæ, Barkoviæ e Zrinjski (2012), onde é integrado um sensor atmosférico (pressão, temperatura e umidade) na base de calibração EDM da faculdade de Geodésia da Universidade de Zagreb. Mediante um sistema composto por um *software*, sensor e estação total, foram

sincronizadas observações MED e medição de parâmetros atmosféricos, num único ponto.

## 2.6 FERRAMENTAS DE DESENVOLVIMENTO

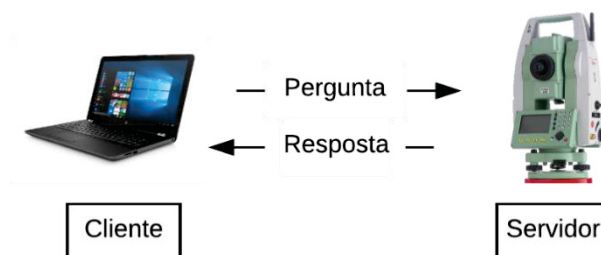
Na atualidade, os avanços tecnológicos fornecem uma ampla gama de ferramentas programáveis para o desenvolvimento de projetos de diferentes naturezas. O conceito de “*ferramentas de desenvolvimento*” no contexto desta pesquisa considera protocolos de comunicação fornecidos pelos fabricantes de instrumentos de observação Geodésica para o desenvolvimento de softwares que permitam o controle das funções destes, em particular, o protocolo de comunicação da GeoCom da *Leica*. Nesta mesma linha, o protocolo e comunicação ZigBee, o hardware de código livre Arduino e sensores de temperatura compatíveis com estes, são “*ferramentas de livre acesso*”. Em seguida são explicadas as principais características de cada um destes.

### 2.6.1 Protocolo de comunicação GeoCom

GeoCom da *Leica*, o qual está baseado na ligação por procedimento remoto (RPC) desenvolvido pela *SUN Microsystem's*. A comunicação neste protocolo precisa de dois participantes, um cliente e um servidor. Geralmente a comunicação é desenvolvida mediante porta serial, mas na atualidade é possível utilizar ou emular portas para o uso de dispositivos *Bluetooth*.

A comunicação em GeoCom é implementada sobre o conceito de *point-to-point*, isto significa que os participantes (cliente e servidor), desenvolvem a comunicação mediante perguntas e respostas. Neste contexto o cliente envia uma pergunta padronizada, (em formato ASCII) e o servidor retorna uma resposta. Na FIGURA 18 é mostrado o princípio de comunicação de GeoCom.

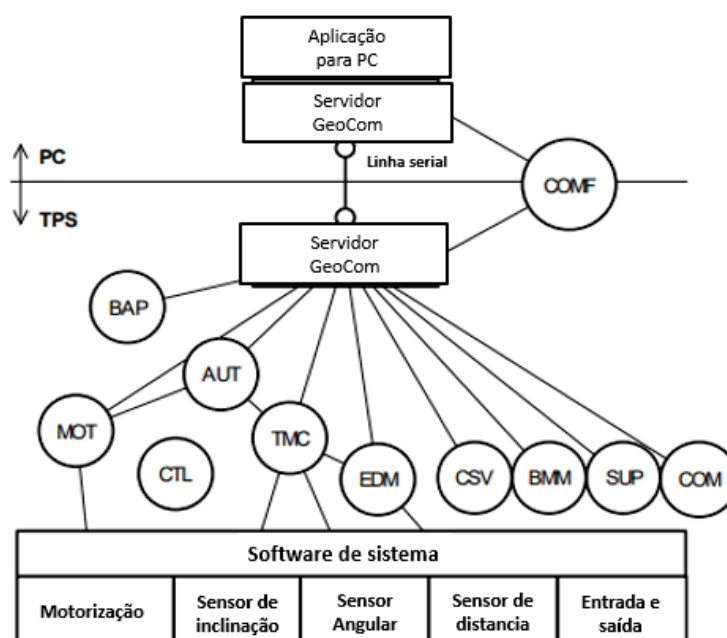
FIGURA 18 - PROTOCOLO GEOCOM



FONTE: O autor (2018)

As principais funções de protocolo são apresentadas na FIGURA 19. Neste diagrama o cliente e o servidor interatuam mediante a comunicação serial. O sistema geral que dispõe o servidor é dividido em cinco subsistemas; motorização, sensor de inclinação, sensores angulares, sensor de distância e aplicações básicas.

FIGURA 19 - FUNÇÕES PRINCIPAIS DO PROTOCOLO GEOCOM

FONTE: Adaptado de *Leica GeoCom* (2018).

Cada subsistema tem algumas funções em particular e outras que são comuns para o sistema geral, estas são definidas conforme TABELA 6.

TABELA 6 – SUBSISTEMAS DO PROTOCOLO GEOCOM DA LEICA

Nome	Definição
MOT	Função para o controle de velocidade do sistema servo-assistido
AUS	Subsistema que contém funções “Shift” e “User”
CSV	Central de serviços, fornece informação básica do estado do sistema
BMM	Funções básicas não relacionadas como as observações, por exemplo, configuração de alarmes, ou sons.
BAP	Aplicações básicas no processo de observação, as quais tornam mais eficiente o processo.
AUT	Nesta função são ativados os parâmetros de pontaria automática e o sistema servo- assistido
CTL	Controle de sistema
TMC	Função principal para a obtenção de dados provenientes de observações, considera-se como um computador central.
SUP	Parâmetro de controle para os valores constantes do sistema
EDM	Módulo de medição de distâncias eletrônicas
COM	Função de comunicação, permite a comunicação entre o servidor e o cliente
COMF	Módulo de comunicação, neste são controlados os parâmetros de comunicação.

FONTE: Adaptado de *Leica GeoCom* (2018)

### 2.6.2 Protocolo de comunicação Zigbee

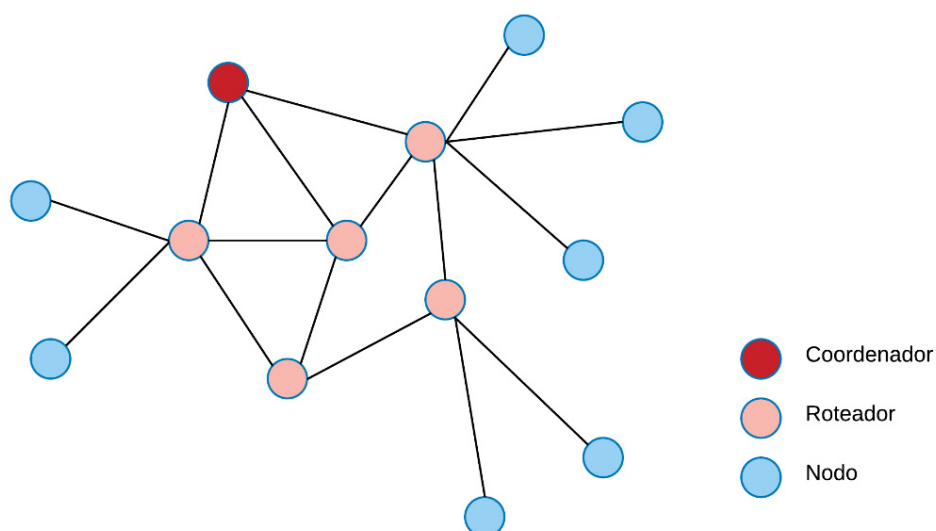
ZiGBEE é um protocolo padrão, propriedade da firma *ZigBee Alliance*, a qual define uma comunicação sem fio padrão IEE 802.15.4. As bandas de operação ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), esta tecnologia utiliza frequências 2,4 GHz, 868 MHz (Europa) e 915 MHz (Estados Unidos). Enquanto a largura da banda permite transferência de dados entre a faixa de 20 kbps até 40kbps, com uma área de cobertura de até 1200 metros (DIGI, 2016).

O ZIGBEE reúne uma série de elementos que permitem a transferência de dados. Sua infraestrutura chamada rede ZigBee, a qual permite até 65.536 dispositivos conectados de forma paralela. Esta composta por:

- **Coordenador:** o coordenador em uma rede ZigBee gera o canal de comunicação entre todos os elementos da rede. Quando são estabelecidos os parâmetros de comunicação, o coordenador permite a transferência de dados entre os elementos da rede (FALUDI, 2010);
- **Roteador:** é o encarregado da comunicação entre os elementos da rede que estão fora do alcance do roteador. Na prática o roteador trabalha como um coordenador com menor hierarquia permitindo ampliar a cobertura da rede, além disso, um roteador permite determinar o melhor trajeto dentro da rede (FALUDI, 2010);
- **Dispositivo escravo ou nodo:** é o dispositivo final da infraestrutura da rede. Este envia dados até o coordenador ou roteador. Geralmente está integrado a sensores para adquirir informação e transmitir aos roteadores ou ao coordenador. O nodo só pode visualizar a informação da rede ou enviar dados (FALUDI, 2010).

Na FIGURA 20 é apresentada a infraestrutura básica de uma rede ZigBee.

FIGURA 20 - REDE BÁSICA DO ZIGBEE

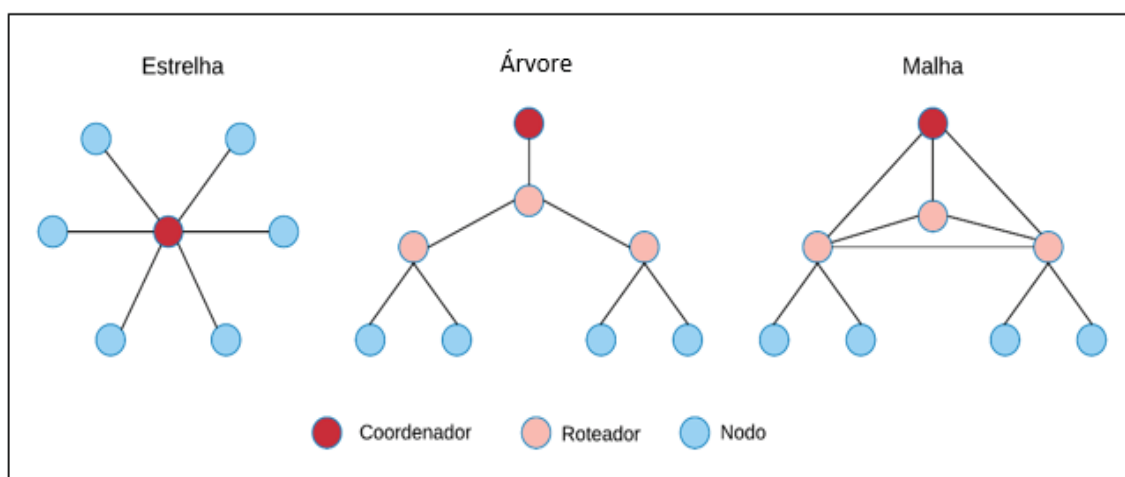


FONTE: O autor (2018)

O desenvolvimento de uma rede ZigBee considera três aspectos de acordo com o desenho e distribuição de seus elementos (FIGURA 21), estes são definidos como:

- Topologia de estrela: esta configuração é composta por um coordenador e múltiplos nodos. Os dados são enviados diretamente desde cada nodo ao coordenador, onde são processados;
- Topologia de árvore: a topologia de árvore é composta por sub-redes, as quais são compostas por roteadores que permitem um eficiente fluxo de informação até o coordenador. Neste tipo de configuração, da mesma forma que na topologia de estrela, não existe comunicação entre os nodos;
- Topologia de Malha: a topologia de malha existe comunicação entre todos os elementos da rede. Neste tipo de configuração é possível enviar a informação por diferentes caminhos, mantendo uma comunicação constante entre os dispositivos.

FIGURA 21 - TOPOLOGIAS ZIGBEE



FONTE: O autor (2018)

A rede Zigbee permite o envio e recepção de dados entre todos os elementos que compõem a rede. Os dados geralmente são fornecidos por sensores integrados nos nodos da rede. O gerenciamento dos dados e sua interpretação pode ser feito mediante um *hardware* de código aberto, o qual interpreta os dados provenientes dos nodos da rede e os transforma em informação (FALUDI, 2010).

Existem duas formas de enviar informação através de uma rede Zigbee, a primeira é mediante o formato transparente, o qual permite o envio sem a necessidade de gerar pacotes de informação, enquanto o formato API



precisa da geração de pacotes de informação e é recomendado para redes de maior tamanho (FALUDI, 2010).

### 2.6.3 Módulo XBee

Os módulos Xbee são soluções integradas que fornecem comunicação sem fio mediante o protocolo de rede chamado IEEE 802.15.4 para trabalhar com conexões ponto a ponto ou em rede. Eles permitem um alto tráfego de dados. Na FIGURA 22 é apresentado um modulo Xbee S2C.

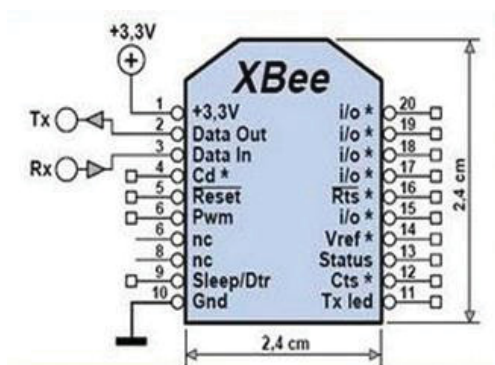
FIGURA 22 – MÓDULO XBEE S2C



FONTE: BRICOGEEK (2018a)

O módulo é constituído de diversos pinos, sendo que cada um têm uma função em particular, no caso deste trabalho foram usados os pinos Tx e Rx para receber e enviar informações via link de rádio, além dos pinos de alimentação de energia. A FIGURA 23 mostra um diagrama com os pinos de um módulo Xbee

FIGURA 23 – PINOS XBEE



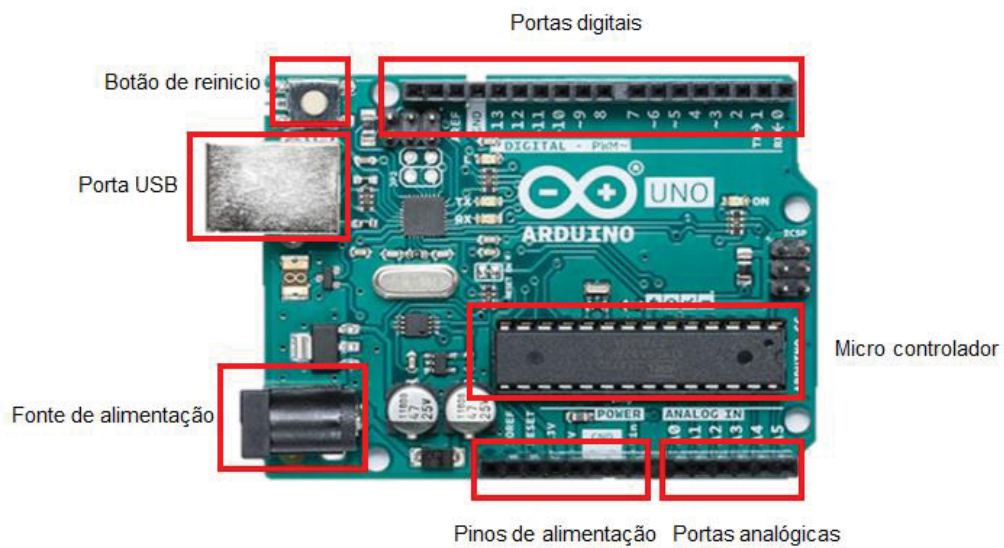
FONTE: KUMAR et al. (2014)

#### 2.6.4 Arduino

Arduino pode ser definido como uma plataforma eletrônica ou hardware de código aberto baseado em uma placa eletrônica programável com entradas e saídas (I/O), mais um entorno de desenvolvimento integrado (BANZI, 2008). Foi desenvolvido inicialmente no instituto IVREA, na Itália, como projeto de teses de mestrado de Hernando Barragan e fundado oficialmente como um projeto de código aberto por Massimo Banzi, David Cuartielles, Tom Igoe, Gianluca Martino e David Mellis (ARDUINO, 2018). Permite abordar diferentes aplicações mediante um ambiente de desenvolvimento integrado ou IDE (*Integrated Development Environment*). No caso de Arduino o conceito de hardware livre permite o acesso aos esquemas de funcionamento com o objetivo de entender seus fluxos de trabalho, fazer modificações, melhorá-lo e compartilhar os resultados com uma comunidade. No caso do IDE, procura-se a possibilidade de empregar o *software* para qualquer propósito e em qualquer sistema operacional, além disso, é possível programar rotinas para necessidades particulares, onde o livre acesso a códigos fonte é requisito prévio. Outro aspecto importante é a distribuição de projetos à comunidade, o que é feito mediante repositórios de livre acesso onde usuários podem compartilhar códigos para desenvolver diferentes projetos (ARTERO, 2013).

O Arduino FIGURA 24 permite a integração de diferentes sensores e diferentes protocolos de comunicação, no contexto desta pesquisa Arduino é parte do processo da automação proposto.

FIGURA 24 - PLACA ARDUINO UNO GENUÍNO



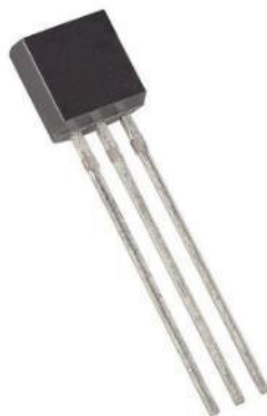
Fonte: Arduino (2018b)

## 2.6.5 Sensores de temperatura

### 2.6.5.1 SENSOR TMP36

Este sensor fornece diferenças de voltagem que podem ser convertidas em temperatura mediante um fator de escala. As principais características deste sensor são mostradas na TABELA 7:

FIGURA 25 - SENSOR DE TEMPERATURA TMP36



Fonte: BRICOGEEK (2018)

TABELA 7 - ESPECIFICAÇÕES DO SENSOR DE TEMPERATURA TMP36

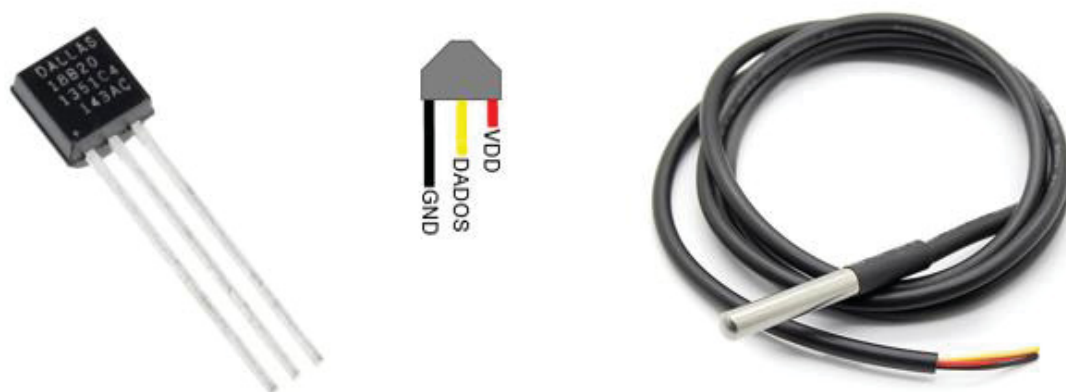
Parâmetro	Valor
Voltagem de operação	2,7 até 5,5 V
Temperatura fornecida	Graus Celsius
Acurácia	$\pm 2^{\circ}\text{C}$ , não precisa calibração
Faixa de operação	$-40^{\circ}\text{C}$ até $125^{\circ}\text{C}$

Fonte: Adaptada BRICOGEEK (2018b)

### 2.6.5.2 SENSOR DS18B20

O sensor de temperatura DS18B20 (FIGURA 26), em um sensor digital que fornece temperatura em um intervalo entre  $-55^{\circ}\text{C}$  até  $+125^{\circ}\text{C}$  que precisa de uma voltagem entre 3,0 V até 5,5 V para seu funcionamento. O sensor é composto por três cabos que permitem a energização e a obtenção de dados. O cabo vermelho ou VDD permite a entrada da voltagem, o cabo preto ou GND é o terra, enquanto o cabo amarelo é o cabo para transmissão dos dados. O sensor DS18B20 apresenta duas versões, Na FIGURA 25 é apresenta a versão clássica (esquerda) e versão a prova de água (direita).

FIGURA 26 - SENSOR DE TEMPERATURA DS18B20

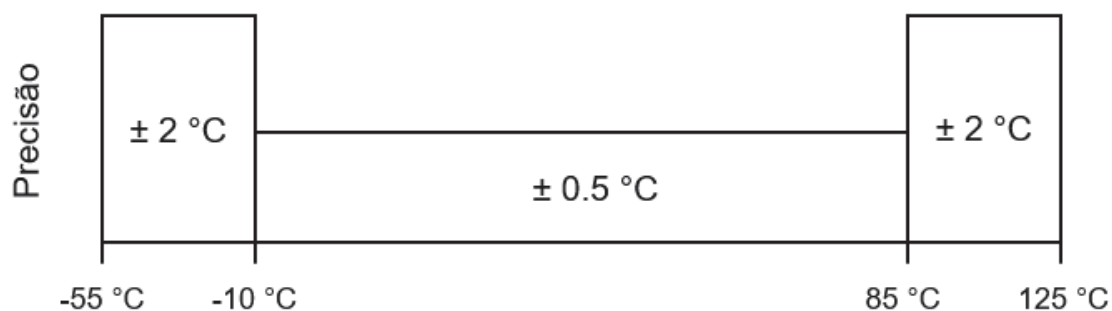


Fonte: Adaptada de FILIPEFLOP (2018)

Para temperaturas entre  $-10^{\circ}\text{C}$  e  $85^{\circ}\text{C}$  a precisão do sensor DS18B20 é  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . Para o resto do intervalo, ou seja, para as temperaturas entre  $-55^{\circ}\text{C}$

e  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  e o intervalo  $85^{\circ}\text{C}$  até  $125^{\circ}\text{C}$  o erro é  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Na FIGURA 27 é apresentado um esquema com os intervalos de precisão.

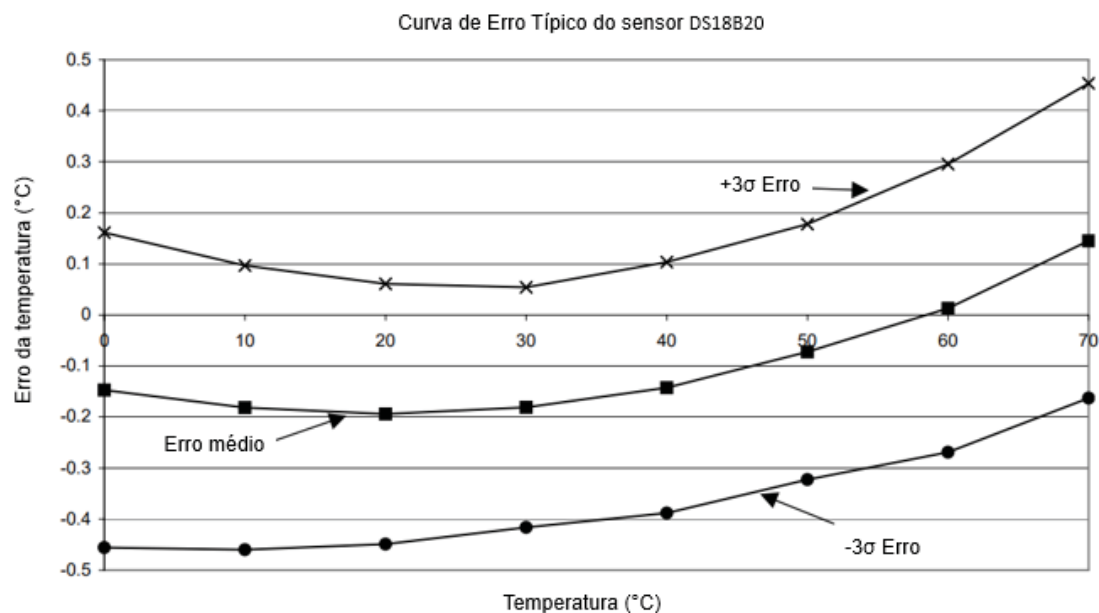
FIGURA 27 - FAIXA DE PRECISÕES DO SENSOR DS18B20



Fonte: Adaptada de FILIPEFLOP (2018)

O erro típico nos valores de temperatura no intervalo entre  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  até  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  para o sensor DS18B20 é apresentado no GRÁFICO 1, com uma confiança de  $\pm 3\sigma$

GRAFICO 1 – CURVA DE ERRO TÍPICO DO SENSOR DS18B20



Fonte: Adaptada de FILIPEFLOP (2018)

## 2.7 MONITORAMENTO GEODÉSICO DE ESTRUTURAS

Os efeitos da correção da primeira velocidade são muitas vezes negligenciados em trabalhos convencionais de levantamentos topográficos, porém em situações onde se deseja determinar a posição de um ponto com maior rigor, como o acaso do monitoramento geodésico, este não pode ser desconsiderado. Desta maneira esta deve ser uma das áreas dentro da Ciências Geodésicas onde se busca aprimorar os métodos de coleta e processamento de dados, sendo a questão dos efeitos de refração um destes focos. O conceito de variações temporais, que aborda a Geodésia, em sua definição como Ciência, procura o estudo do comportamento de pontos no espaço, as mudanças no tamanho da Terra e do campo da gravidade no tempo. Embora o conceito de deformação geralmente esteja associado com estes estudos, uma das definições de deformação está diretamente relacionada com a dinâmica interna de um corpo (SANSÒ; GIL, 2007), ou seja, o monitoramento Geodésico fornece, em termos mensuráveis, efeitos da deformação. Porém no monitoramento de estruturas devem ser considerados deslocamento que não são sempre gerados pela deformação interna de um corpo, por exemplo deslocamentos de terra.

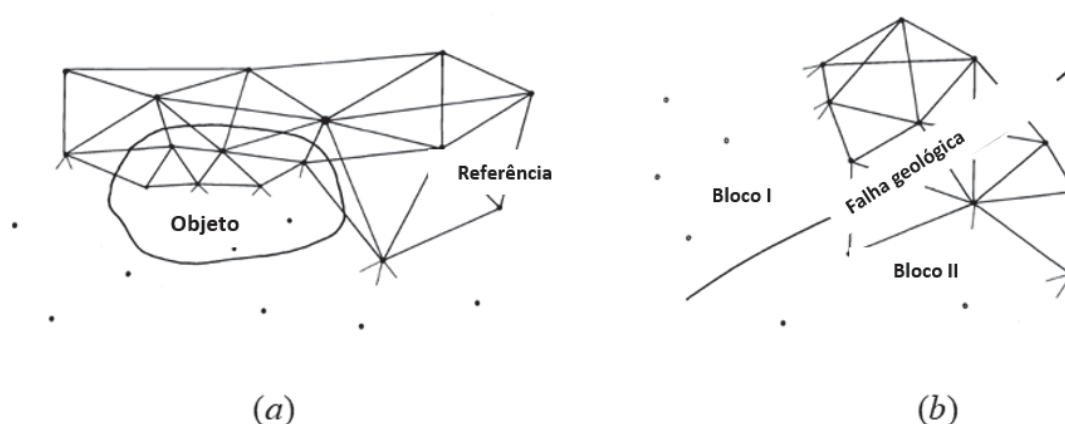
O monitoramento Geodésico é desenvolvido em diferentes cenários, geralmente são considerados aspectos de pesquisa ou ciência e aplicações de engenharia. Além disso, a periodicidade do monitoramento tem diferentes escalas de tempo (minutos, horas, anos ou décadas). Para Caspary e Rüeger (1987) o monitoramento é aplicado em estudos sobre o movimento da crosta terrestre (geodinâmica), fluência de encostas, movimentação de glaciares, ou estruturas. No mesmo contexto os mesmos autores definem três objetivos com respeito ao monitoramento:

- Estabelecimento ou verificação de hipóteses nas áreas da geofísica, geologia, glaciologia e ciências da engenharia;
- Avaliação de segurança e desempenho de estruturas em engenharia;
- Proteção da população contra os riscos causados por deslizamentos de rochas, estruturas de engenharia, determinação da responsabilidade por danos causados por mineração, escavação de túneis e atividades similares.

No caso do monitoramento Geodésico de estruturas as mudanças na forma, escala e posição de uma estrutura são quantificadas mediante as análises de seus deslocamentos em diferentes épocas, geralmente procura-se desenvolver um monitoramento em três dimensões, porém, com objetivo de obter uma melhor acurácia o monitoramento horizontal e vertical são feitos separadamente, comumente procura-se um monitoramento periódico e automatizado (OGUNDARE, 2015).

Geralmente o monitoramento Geodésico de estruturas está associado ao desenvolvimento de uma rede Geodésica, a qual é obtida por observações redundantes em uma época  $t_0$  ou inicial. A análise dos deslocamentos dos pontos que formam a rede em sucessivas épocas  $t_n$ , constitui o monitoramento. Tanto a distribuição dos pontos como a quantidade destes, são definidos a partir do conceito de projeto ou *design* de rede geodésica. Alguns dos critérios para o estabelecimento dos pontos da rede de monitoramento são: a estabilidade do lugar, a topografia (diretamente relacionado com a técnica empregada), as dimensões da estrutura e uma análise antecipada dos deslocamentos da região ou objeto monitorado. Na FIGURA 28 são apresentados dois dos desenhos mais comuns para uma rede de monitoramento.

FIGURA 28 - REDES DE MONITORAMENTO



FONTE: Adaptado de Caspary e Rüeger (1987)

A FIGURA 28 (a) apresenta uma rede que está composta por pontos sobre o objeto monitorado e na região adjacente, esta última chamada rede de

referência. Neste caso os deslocamentos dos pontos sobre o objeto monitorado são avaliados com respeito à rede de referência. No caso da FIGURA 28 (b), só existem pontos sobre o objeto monitorado. Aqui a rede está dividida em duas sub-redes e só é possível avaliar os deslocamentos relativos entre os pontos de ambos blocos (CASPARY; RÜEGER, 1987). Algumas das principais características das redes de monitoramento são definidas por Ogundare (2015) como:

- São baseadas em uma rede de superfície com pontos interconectados por médias de ângulos ou distâncias;
- O conceito de redundância nas observações é a chave para a avaliação estatística e de qualidade. Além disto, permite a detecção de erros nas medições. Geralmente as observações em diferentes épocas e os valores obtidos são produtos de um ajuste por mínimos quadrados;
- Os resultados fornecem uma visão geral com respeito à tendência do deslocamento, portanto os efeitos da deformação no objeto são evidenciados através dos deslocamentos dos pontos da rede.
- Existe uma tendência para a automação, com o objetivo de reduzir os erros associados ao operador;
- Os custos do monitoramento Geodésico geralmente são mais elevados em comparação com o monitoramento Geotécnico;
- No caso de tecnologias que precisem de intervisibilidade, as observações são dependentes das condições ambientais.

Com relação às tecnologias empregadas no monitoramento Geodésico de estruturas, comumente são empregados níveis digitais, estação totais e receptores GNSS. A seleção de uma tecnologia em particular está associada a critérios de design das redes e aos objetivos propostos. Na TABELA 8, são apresentadas as principais características de cada tecnologia.



TABELA 8 - INSTRUMENTOS EMPREGADOS EM MONITORAMENTO

<b>Tecnologia</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Estação total	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fornece a posição 3D em tempo real</li> <li>• O monitoramento pode ser automatizado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Só observa pontos discretos</li> <li>• As distâncias são afetadas pela refração</li> <li>• A capacidade do operador é uma fonte de incerteza</li> <li>• Nos sistemas automatizados, a resolução dos sistemas de pontaria automática são uma limitante</li> <li>• Precisa de linha de visada</li> </ul>
Níveis digitais	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possuem uma alta acurácia</li> <li>• Seus resultados são confiáveis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Está sujeita aos efeitos da refração</li> <li>• O procedimento é caro e lento</li> <li>• Precisa de linha de visada</li> </ul>
GNSS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fornece a posição 3D em tempo real</li> <li>• Não precisa linha de visão</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limitado pela quantidade de satélites</li> <li>• Sujeito ao erro da multicaminho</li> <li>• Sujeito ao atraso troposférico</li> <li>• Tem-se um grande número de pontos monitorados o que não é econômico</li> </ul>

FONTE: Adaptado de Ogundare (2015)

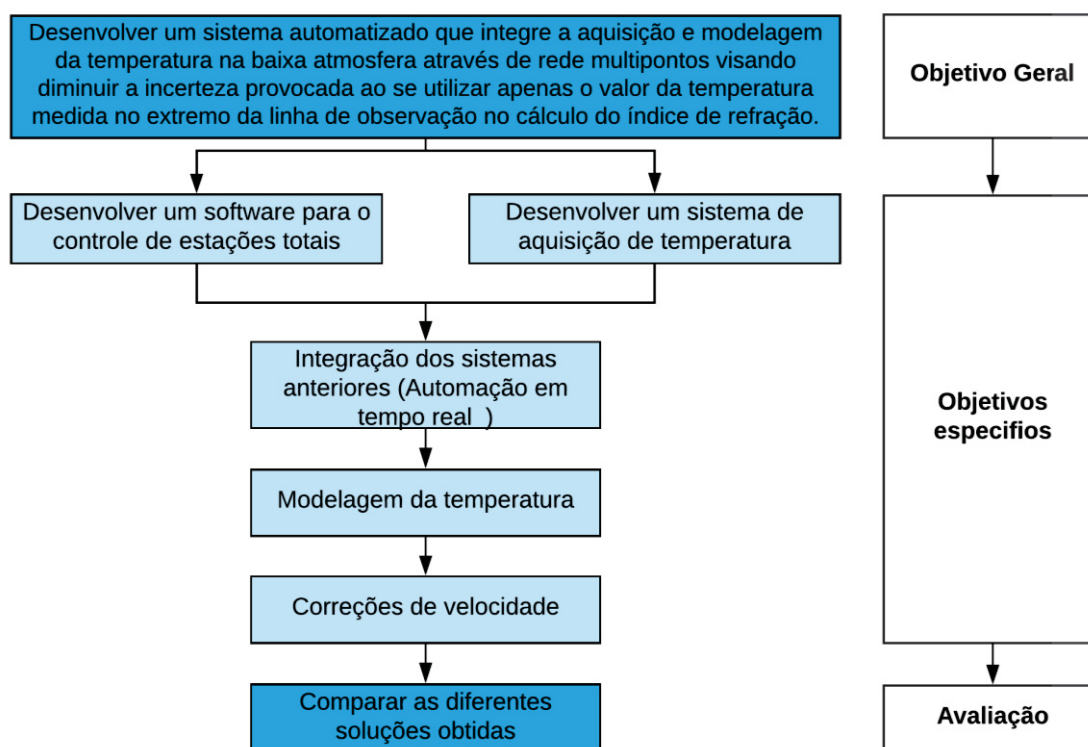
Uma desvantagem transversal à tecnologia empregada no monitoramento Geodésico são os efeitos atmosféricos. No caso de observações de distâncias, direções e desníveis, a refração é uma fonte de incerteza que precisa ser cuidadosamente modelada. No contexto da pesquisa desenvolvida, as distâncias obtidas com base na tecnologia MED, necessitam de uma alta precisão, para ser empregadas no monitoramento Geodésico.

A correta determinação do índice de refração é um desafio no monitoramento Geodésico, principalmente devido às variações da temperatura na região próxima à superfície da Terra pelos processos de turbulência, e a diminuição com a altitude, além disso, a temperatura gerada pela estrutura monitorada pode gerar microclimas que são uma fonte a mais de incerteza.

### 3 METODOLOGIA

De acordo os objetivos apresentados no capítulo 1, foi necessário realizar uma série de diferentes atividades que forneceram os dados para validar a hipótese deste trabalho. Neste contexto na FIGURA 29, são apresentados em resumo os principais tópicos desenvolvidos em cada uma das atividades, de forma a organizar o fluxo da pesquisa.

FIGURA 29 - METODOLOGIA GERAL



FONTE: O autor (2018)

A metodologia foi dividida em três grandes etapas: (1) desenvolvimento, implantação e teste do *software* para interface com uma estação total; (2), desenvolvimento, implantação e teste dos sistemas para coleta de informações ambientais multiponto; (3) Integração dos sistemas, modelagem e testes.

Na primeira etapa, estudou-se o protocolo de comunicação de GeoCom da *Leica*. Este protocolo admite um fluxo de dados entre uma estação

total e um computador via porta serial RS232 ou *bluetooth*. O sistema funciona baseado no conceito “*servidor – usuário*” e o intercâmbio de dados mediante “*perguntas e respostas*”. Esta característica permite por meio de códigos de controle em formato ASCII acionar diferentes funções de uma estação total. Com base nesta característica, foi desenvolvido o *software* para o controle das estações totais da *Leica*, dando ênfase principalmente no controle do medidor de distâncias eletrônicas.

Na segunda etapa, desenvolve-se um sistema que permite a coleta de dados de temperatura empregando-se sensores externos juntamente com a plataforma Arduino, bem como a integração com os dados de distâncias obtidos a partir do MED. Realizou-se a seleção do sensor que fornece a temperatura e sua calibração em laboratório, sendo que neste caso foram escolhidos sensores de temperatura de baixo custo, considerando principalmente a possibilidade de distribuir estes em pontos específicos ao longo do percurso da onda eletromagnética irradiada. Numa primeira instância foram considerados 2 sensores localizados nos extremos da linha visada, e posteriormente, diversos sensores distribuídos na área onde realizaram-se as observações geodésicas.

O fluxo de informação da temperatura foi idealizado mediante o conceito de rede de sensores em tempo real. Neste sentido foram estudados diferentes sistemas de comunicação que permitem atingir este objetivo (Wifi, Bluetooth, GSM, UHF). O protocolo selecionado corresponde ao ZigBEE apresentado no capítulo 2.6.2, o qual possibilita a comunicação mediante radiofrequência em tempo real entre  $n$  sensores distribuídos numa determinada área.

Na sequência integrou-se os dois sistemas anteriormente citados viabilizando a sincronização das observações de distâncias e as leituras dos sensores de temperatura. Uma característica deste sistema é a automação do processo de filtragem e modelagem dos dados de temperatura mediante diferentes critérios (apresentados no capítulo 3.1). Finalmente foi possível calcular as correções de velocidade avaliando a modelagem de temperatura considerando o valor médio a partir de dados fornecidos pelos sensores nos extremos da linha visada.

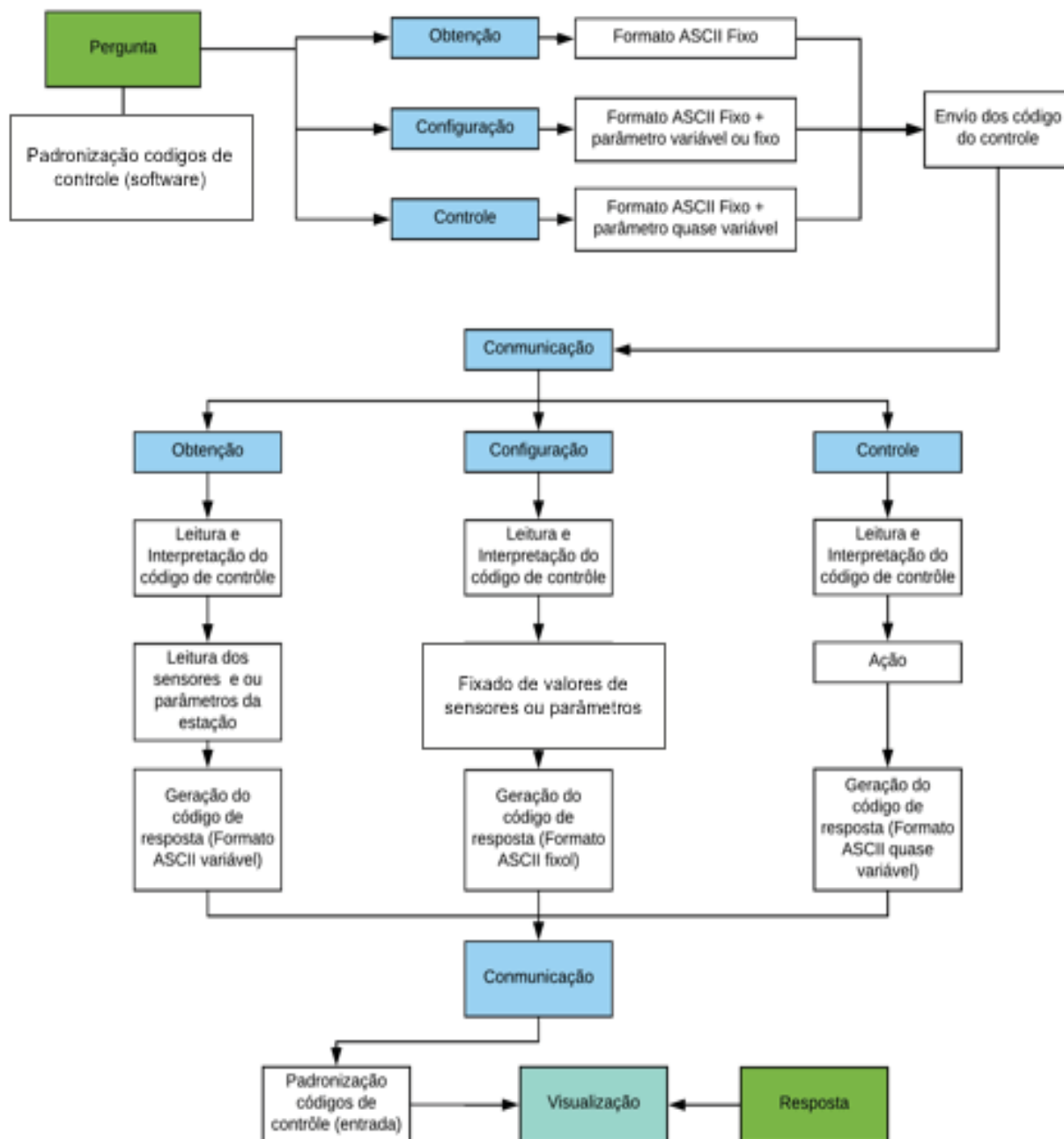
### 3.1 DESENVOLVIMENTO DE UM *SOFTWARE* PARA O CONTROLE DE UMA ESTAÇÃO TOTAL

O *software* desenvolvido é composto por um sistema geral dividido em quatros subsistemas: comunicação, configuração, controle e obtenção de dados. O subsistema de comunicação foi definido com uma hierarquia maior comparado aos subsistemas restantes, principalmente pelo rol fundamental que este tem para o fluxo de comunicação bidirecional de dados. A linguagem de programação empregada no desenvolvimento do *software* foi C# através da plataforma *visual studio 2018*. Em seguida é definida a função de cada um dos subsistemas:

1. Comunicação: este subsistema permite a conexão entre a estação total e o hardware que contém o *software* desenvolvido. A conexão pode ser feita mediante *Bluetooth* ou cabo serial. Em ambos os casos é possível configurar parâmetros de comunicação como a porta serial e a velocidade de transmissão, além disso, foi programado um terminal com o objetivo de testar o funcionamento do sistema;
2. Configuração: o subsistema de configuração permite fixar parâmetros para o desenvolvimento de levantamentos Geodésicos/topográficos e selecionar funções como método de medição ou habilitar o nível eletrônico. Possibilita igualmente inserir coordenadas de origem, orientação, altura do instrumento e sinal;
3. Obtenção: neste são lidos e visualizados os parâmetros atuais da estação total, tais como, direções horizontais e ângulo vertical, hora, data, número de série, constante do prisma, entre outros;
4. Controle: contém as funcionalidades que permitem usar os elementos automatizados da estação total, tais como o sistema de pontaria automática ou o sistema servo-assistido para observação de múltiplas direções.

O diagrama da FIGURA 30 mostra o funcionamento do *software* desenvolvido. Nele são exemplificados os formatos dos códigos de controle para cada um dos subsistemas e como estes foram padronizados visando tornar mais eficiente o uso do *software*.

FIGURA 30 - DIAGRAMA GERAL DE FUNCIONAMENTO DO SOFTWARE PARA O CONTROLE DE ESTAÇÕES TOTAIS



FONTE: O autor (2018)

A padronização dos códigos de controle mostrados no diagrama da FIGURA 29 procura tornar mais eficiente o envio de dados do *software* à

estação total. Neste caso os códigos de controle são diferenciados de acordo aos seguintes critérios:

- Parte fixa: corresponde à diferenciação entre pergunta e resposta. Esta tem um identificador para cada função em particular, por exemplo, no caso do subsistema de obtenção a informação do ângulo horizontal e vertical é dada pelo requerimento **%R1Q,2107:**. Neste caso a primeira parte da *string* (**%R1Q**) indica que o código corresponde a uma pergunta, enquanto a segunda parte (**2107**) indica o tipo de requerimento.

A resposta ao requerimento anterior (**%R1Q,2107:**), é dada pelo *string* (**%R1P,0,0:0,HZ,V,distância inclinada**), onde a parte fixa corresponde ao termo (**%R1P,0,0**), a qual indica resposta.

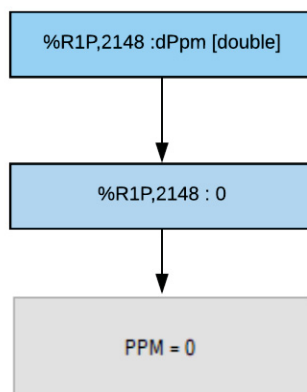
- Partes variáveis: as partes variáveis correspondem a uma mudança na função usada, por exemplo: no caso das perguntas, o requerimento para ângulo horizontal e vertical é **%R1Q,2107:**. Caso o usuário necessite também da distância inclinada a *string* aumenta em um termo, ficando como: **%R1Q,2107:2**. Onde (2) é a parte variável do protocolo.

No caso das respostas a parte variável é composta pela informação procurada a partir de um requerimento. Considerando a resposta (**%R1P,0,0:0,HZ,V,distância inclinada**), os parâmetros HZ, V e distância inclinada correspondem à parte variável.

Considerando as partes fixas e variáveis no processo de padronização foram adoptados critérios para filtragem dos códigos de controle, segundo os seguintes formatos:

- Formato ASCII fixo: neste caso o código de controle está associado a um botão que envia automaticamente o código com um determinado valor até a estação total. Na prática a parte variável é considerada fixa. A FIGURA 31 mostra o envio automático para a configuração de correções ambientais com valor zero:

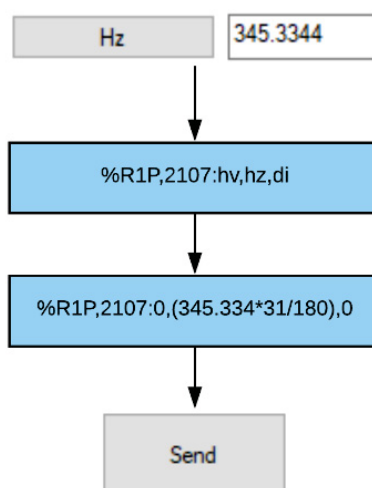
FIGURA 31 – CONFIGURAÇÃO DE CORREÇÕES AMBIENTAIS



FONTE: O autor (2018)

- Formato ASCII variável: o formato variável precisa que o usuário insira um valor (parte variável) que será associado ao código controle enviado. Na FIGURA 32 é amostrado o envio de um valor para fixar o ângulo horizontal. Neste caso o valor inserido completa o código de controle enviado.

FIGURA 32 – CONFIGURAÇÃO DO ÂNGULO HORIZONTAL

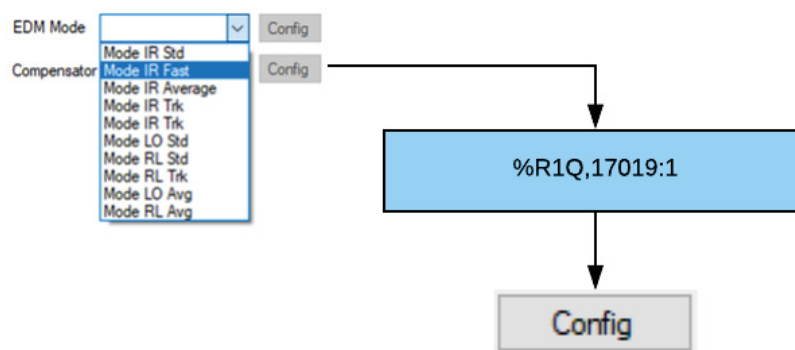


FONTE: O autor (2018)

- Formato ASCII quase variável: este formato associa diferentes valores fixos na parte do código variável para completar um código. Para a

seleção do método de funcionamento do MED, a FIGURA 33 mostra a forma como o usuário consegue configurar a opção de “*medição rápida com prisma*”.

FIGURA 33 – CONFIGURAÇÃO DO MÉTODO DE MEDIÇÃO MED



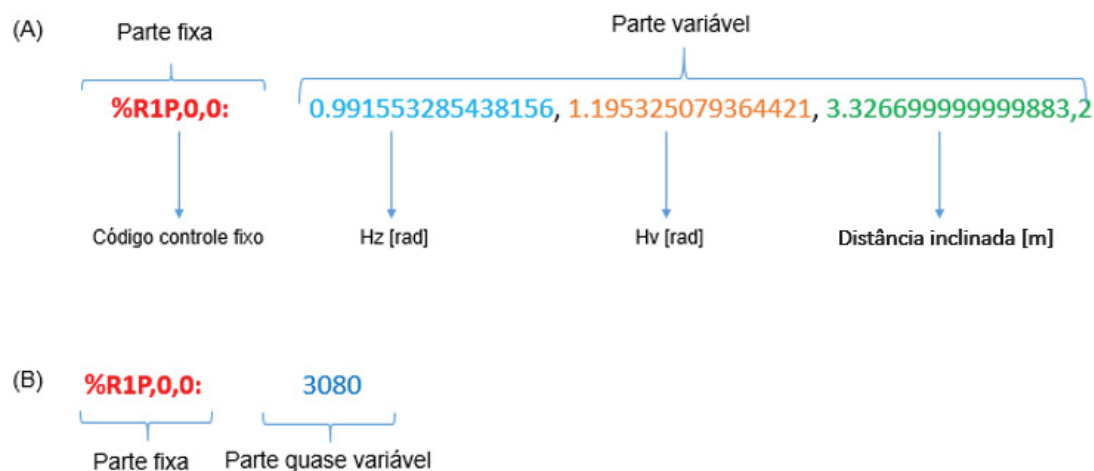
FONTE: O autor (2018)

Os processos de leitura e interpretação permitem avaliar o código de controle enviado. Se o código é correto, a estação total executa uma ação e informa mediante um código. No caso contrário só é enviado um código de erro. No subsistema de obtenção, onde são lidos os sensores angulares e informações do sistema (número de série, data, modelo, entre outros) o código de resposta pode ser variável ou quase variável, ou seja, é enviado um parâmetro fixo, mais os valores lidos da estação total ou um valor associado a uma resposta, nestes casos o processo de interpretação é definido como correto. No caso contrário é retornado um código fixo associado a um erro.

Para o subsistema de configuração a leitura e interpretação gera respostas quase variáveis. Por exemplo, quando o usuário insere um valor para a altura instrumental, é retornado um código associado a inserção correta ou incorreta. Da mesma forma são geradas as respostas no subsistema de controle.

Na FIGURA (34 - A) é apresentada a resposta para o requerimento **%R1Q,2107:2** (ângulos e distâncias), enquanto que a FIGURA 34 – B mostra um código de erro associado às sintaxes da mesma pergunta.



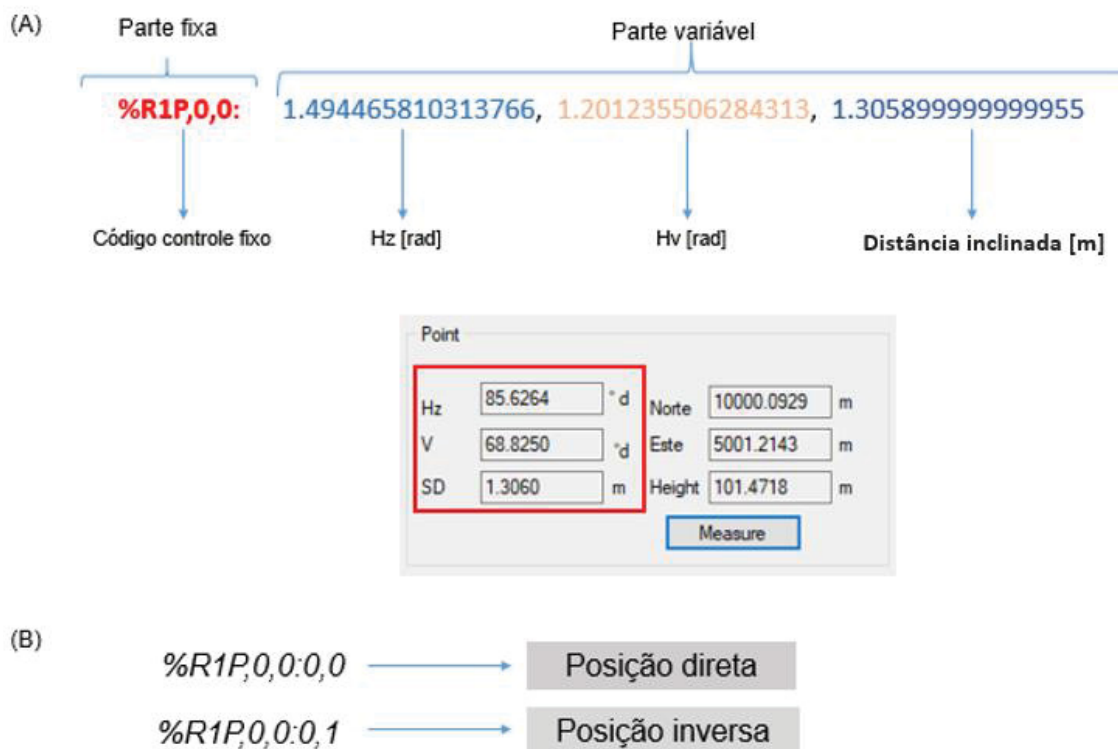
FIGURA 34 – CÓDIGOS DE CONTROLE *LEICA* GEOCOM

Fonte: O autor (2018)

Outro caso de respostas variáveis pode ser exemplificado com o código de controle **%R1Q, 2026:**, o qual é empregado para obter a posição da luneta. Neste caso podem ser obtidas duas respostas: **%R1P,0,0:0,0** e **%R1P,0,0:0,1**, o que indica posição direta e inversa respectivamente. No mesmo contexto para instrumentos robotizados o controle da posição do telescópio (PD e PI) tem o código de requerimento **%R1Q,9028:** e uma resposta **R1P,0,0:0** quando a ação é feita corretamente.

Na visualização dos códigos de resposta, procura-se uma filtragem associado com uma simplificação na apresentação da informação. Os filtros desenvolvidos podem ser de duas formas: eliminação da parte fixa das respostas mostrando valores numéricos ou associação de uma resposta e um valor alfanumérico. Na FIGURA 35 - A é apresentada a filtragem feita sobre código de resposta para a leitura do ângulo horizontal e vertical, mais a distância inclinada. Enquanto que na FIGURA 35 – B ilustra a filtragem feita sobre a resposta para a posição da luneta da estação total.

FIGURA 35 – FILTRAGEM DAS RESPOSTAS FORNECIDAS



Fonte: o autor (2018)

A interface do *software* desenvolvido bem como os materiais empregados para o seu desenvolvimento, são apresentadas na FIGURA 36 e na TABELA 9 respectivamente.

FIGURA 36 - JANELA DO SOFTWARE PARA O CONTROLE DE ESTAÇÕES TOTAL

Comunicação | Obtenção | Controle | Set

Configuração serial

Porta: COM2 Baud rate: 9600

Enviar:  Receber:

Abrir Porta Enviar

Limpar Rx Fechar porta

Saída

Estação

Norte: 1000.000 m H estação: 1.210 m

Este: 5000.000 m H sinal: 1.800 m

Altura: 100.000 m Cte prisma: 0.034 m

Config

Hz

Hz: 0 0 0 Configuração

Ponto

Hz: 000.000 ° d Norte: 1500.000 m

V: 000.000 ° d Este: 5000.000 m

SD: 500.000 m Height: 100.000 m

Medição

Estado TLS

Estado Sensor

FONTE: O autor (2018)

TABELA 9 - MATERIAIS EMPREGADOS NO DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE PARA O CONTROLE DE ESTAÇÕES TOTAIS

(Continua)


Marca / Modelo	Acurácia angular	Acurácia nas distâncias	Fotografia
Leica / TS15 e acessórios de comunicação (cabo RS232)	1"	1 mm + 1,5ppm	
Leica / TS1205 e acessórios de comunicação (cabo RS232)	1"	1mm + 1,5ppm	

TABELA 9 - MATERIAIS EMPREGADOS NO DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE PARA O CONTROLE DE ESTAÇÕES TOTAIS

(Conclusão)

Marca / Modelo	Acurácia angular	Acurácia nas distâncias	Fotografia
Visual Studio 2017 e linguagem de programação C#	Não aplica	Não aplica	Não aplica
Notebook Lenovo I5	Não aplica	Não aplica	Não aplica

FONTE: O autor (2018)

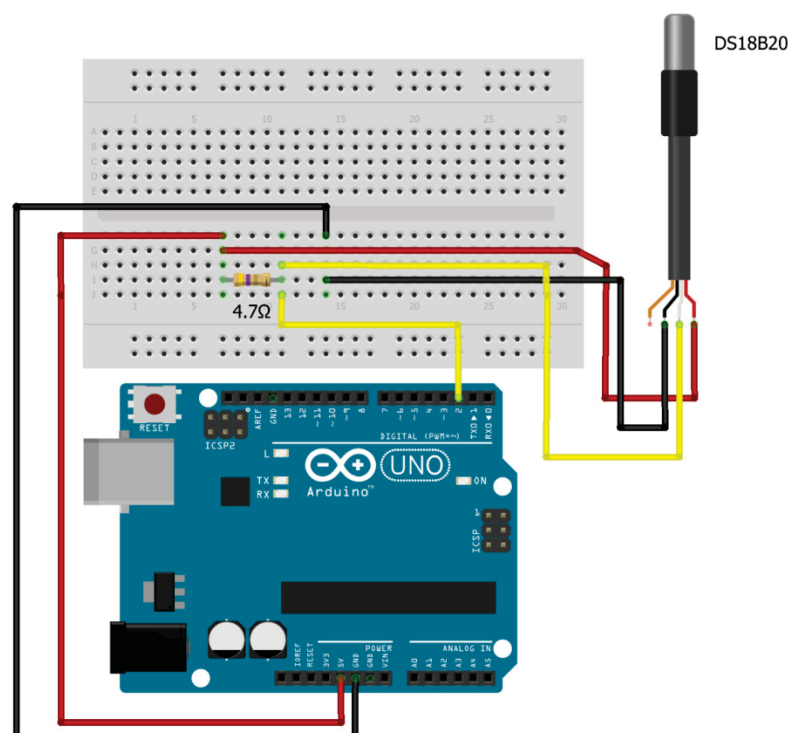
### 3.2 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE TEMPERATURA

O sistema de aquisição foi desenvolvido pensando no conceito de rede de monitoramento em tempo real. Para isto o mesmo foi composto por sensores de temperatura integrados a um sistema de comunicação sem fio, o que permite o envio de dados em tempo real dos sensores ou nodos até um coordenador, o qual é o encarregado de coletar os dados fornecidos pela rede. Cada sensor ou nodo da rede é composto por um sensor digital DS18B2, uma placa programável Arduino uno, um modulo Xbee e uma fonte de alimentação. Já o coordenador é composto por um modulo Xbee e uma placa Arduino uno. Cada elemento deste sistema é apresentado a seguir.

#### 3.2.1 Arduino e sensor DS1820

Um primeiro teste realizado teve como objetivo realizar a conexão entre o Arduino Uno e sensor de temperatura DS18B20, para isto foi seguido o esquema de conexão de embaixo:

FIGURA 37 - CONEXÃO SENSOR DS18B20 - ARDUINO



FONTE: O autor (2018)

Foi usado um sensor DS18B20, uma placa Arduino uno, uma *protoboard*, uma resistência de 4,7Ω e cabos. Foram usadas 4 bibliotecas para a programação no IDE do Arduino, duas delas permitem o controle do sensor DS18B20 (*OneWire.h* e *DallasTemperature.h*). Enquanto as outras duas permitem obter a data e hora das medições (*Time.h* e *Timelib.h*), todas as bibliotecas usadas nesta pesquisa são de livre acesso. Na FIGURA 38 é apresentada parte da programação realizada:

FIGURA 38 - PROGRAMAÇÃO ARDUINO DS18B20

```

DS18B20multi
#include <Time.h>
#include <TimeLib.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

// Pin donde se conecta el bus 1-Wire
const int pinDatosDQ = 2;

// Instancia a las clases OneWire y DallasTemperature
OneWire oneWireObjeto(pinDatosDQ);
DallasTemperature sensorDS18B20(&oneWireObjeto);

void setup() {
  // Iniciamos la comunicación serie
  Serial.begin(9600);
  // Iniciamos el bus 1-Wire
  sensorDS18B20.begin();
  setTime(18,10,00,13,07,2018);
}

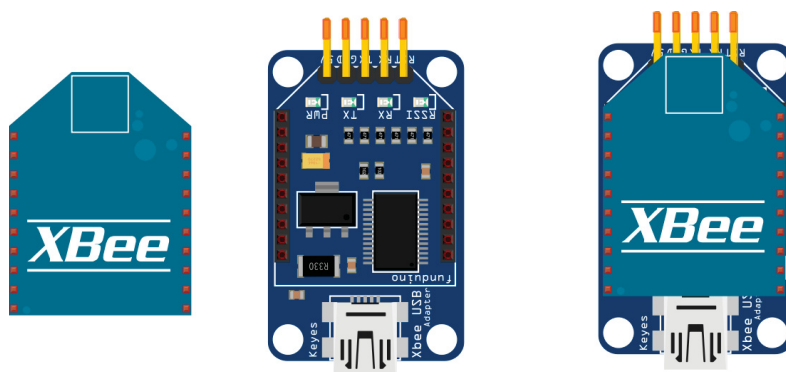
```

FONTE: O autor (2018)

### 3.2.2 Configuração Xbee

A configuração dos módulos Xbee é feita mediante o programa XCTU fornecido pela DIGI. Para a configuração dos módulos é necessário efetuar a comunicação entre o dispositivo e um computador, para isto o adaptador *USB Explorer*, o qual tem uma porta *mini-usb* que permite a conexão com o computador e um *socket* especialmente acondicionado para ligar módulos Xbee nele. Na FIGURA 39 são apresentados o modulo Xbee, o adaptador *USB Explorer* e a conexão entre ambos.

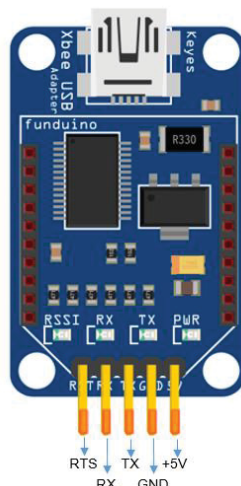
FIGURA 39 - CONEXÃO XBEE - USB EXPLORER



FONTE: O autor (2018)

Os adaptadores USB Explorer fornecem 5 saídas através dos pinos apresentados na FIGURA 40 na parte inferior da figura.

FIGURA 40 - PINOS USB EXPLORER



FONTE: O autor (2018)

Feita a conexão, no *software* XCTU criou-se uma rede com um coordenador e 4 roteadores. Para isto, configurou-se o protocolo ZIGBEE, o canal, o modo de funcionamento (API), o identificador e o parâmetro de funcionamento (coordenador ou roteador). A FIGURA 41 apresenta a configuração do Xbee no XCTU.

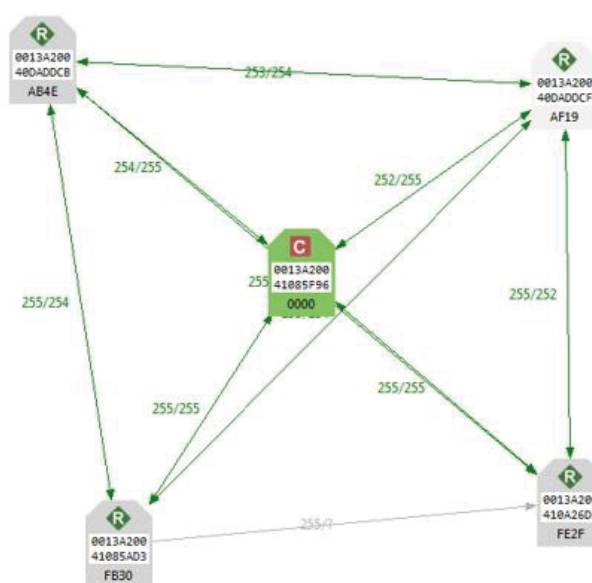
FIGURA 41 - CONFIGURAÇÃO XBEE EM SOFTWARE XCTU

	<b>Name:</b> Router <b>Function:</b> ZIGBEE TH Reg <b>Port:</b> COM15 - 9600/8/N/1/N - API 2 <b>MAC:</b> 0013A20041085AD3	X + -
	<b>Name:</b> Router <b>Function:</b> ZIGBEE TH Reg <b>Port:</b> COM5 - 9600/8/N/1/N - API 2 <b>MAC:</b> 0013A200410A26D3	X + -
	<b>Name:</b> Router 4 <b>Function:</b> ZigBee Router API <b>Port:</b> COM7 - 9600/8/N/1/N - API 2 <b>MAC:</b> 0013A20040DADDC8	X + -
	<b>Name:</b> Coordenador <b>Function:</b> ZIGBEE TH Reg <b>Port:</b> COM2 - 9600/8/N/1/N - API 2 <b>MAC:</b> 0013A20041085F96	X + -
	<b>Name:</b> Router 3 <b>Function:</b> ZigBee Router API <b>Port:</b> COM8 - 9600/8/N/1/N - API 2 <b>MAC:</b> 0013A20040DADDCF	X + -

FONTE: O autor (2018)

Posteriormente, testou-se a comunicação bidirecional entre os módulos Xbee que compõem a rede no *software* XCTU, a FIGURA 42 é apresentada a rede gerada pelos dispositivos Xbee, onde cada nodo e o roteador são identificados por seu endereço, e também a quantidade de conexões disponíveis (254/255).

FIGURA 42 - REDE API CONFIGURADA NO SOFTWARE XCTU



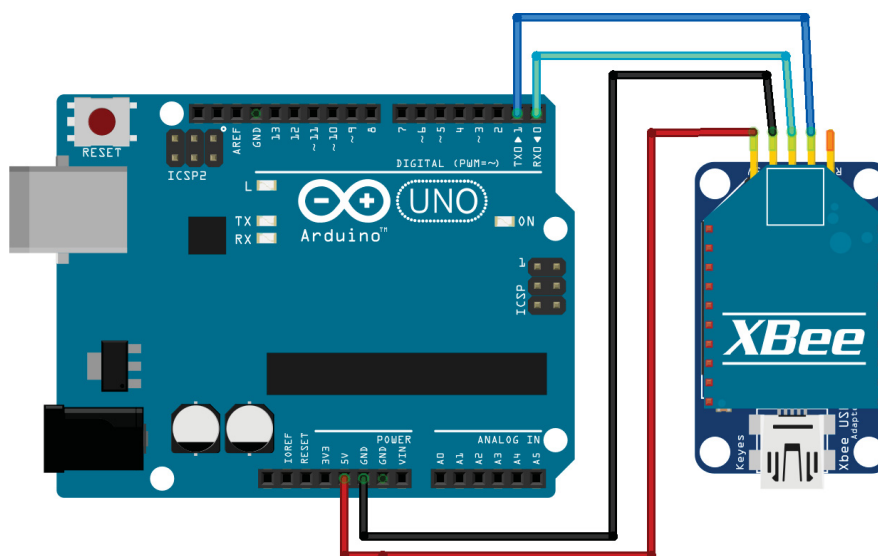
FONTE: O autor (2018)

### 3.2.3 Integração Xbee – Arduino

A integração entre o Arduino e o dispositivo Xbee, foi feita mediante a conexão entre o adaptador *USB Explorer* e a placa Arduino Uno. Para isto foram seguidas as instruções de conexão da biblioteca de livre acesso *Xbee-Arduino.h*. A biblioteca fornece uma programação feita para que Arduino possa trabalhar em conjunto com protocolo API. A conexão é apresentada na FIGURA 43.



FIGURA 43 - CONEXÃO ARDUINO E XBEE



FONTE: O autor (2018)

Onde a tabela 10 apresenta os detalhes da conexão:

TABELA 10 – PRINCIPAIS PINOS XBEE

Xbee	Arduino
PIN 1	+5V
PIN 10	GND
PIN 2 (TX)	PIN 0 (RX)
PIN 3 (RX)	PIN 1 (TX)

FONTE: O autor (2018)

Os elementos principais da programação TX da biblioteca Xbee-Arduino associadas ao roteador são o endereço de destino para o envio dos dados, o qual corresponde ao número de série do coordenador da rede (XbeeAddress64), o pacote enviado (*payload*) e a identificação do roteador (*addr64*). Na FIGURA 44 são apresentados os elementos principais.

FIGURA 44 - CODIGO TX API



```

TX_API $
#include <XBee.h>

XBeeAddress64 addr64 = XBeeAddress64(0x0013a200,0x041085f96);
ZBTxRequest tx = ZBTxRequest(addr64, payload, sizeof(payload));

xbee.send(tx)
delay (60000)

```

FONTE: O autor (2018)

No caso do coordenador os elementos principais são o endereço do roteador (XBeeAddress64), e a leitura do pacote (ZBRxResponse). Na FIGURA 45 são apresentados os elementos principais da programação RX da biblioteca Xbee-Arduino.

FIGURA 45 - CÓDIGO RX API



```

RX_API $
#include <XBee.h>

XBeeAddress64 senderLongAddress = zbRx.getRemoteAddress64();
ZBRxResponse zbRx = ZBRxResponse();
Serial.print(senderLongAddress.getLsb());
Serial.print(",");
Serial.print(u.fval);

```

FONTE: O autor (2018)

Foram configurados 4 nodos para o envio de dados (TX) e um coordenador para a recepção deles (RX). A biblioteca foi modificada com o objetivo de obter a visualização de um identificador particular para cada nodo. Desta forma os primeiros experimentos realizados fornecem uma parte do endereço associado ao número do serie do modulo Xbee mais um texto cada 1 minuto:

FIGURA 46 - MENSAGEM DOS NODOS

```

Rx desde = 0013A200 4055b094
Mensagem = Router 1

Rx desde = 0013A200 406FB6b5
Mensagem = Router 2

Rx desde = 0013A200 4055b094
Mensagem = Router 1

Rx desde = 0013A200 406FB6b5
Mensagem = Router 2

Rx desde = 0013A200 4055b094
Mensagem = Router 1

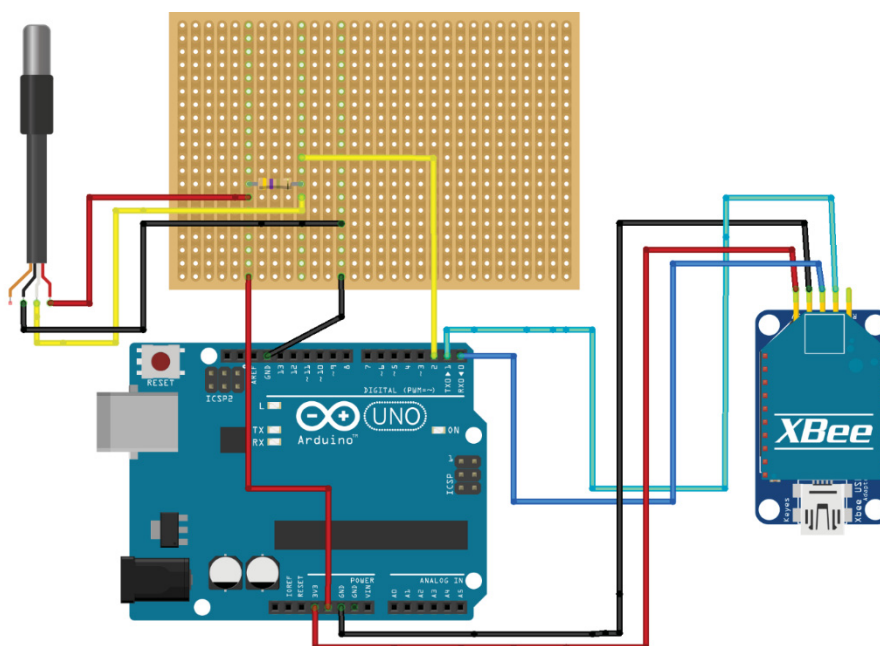
```

FONTE: O autor (2018)

### 3.2.4 Configuração do sensor ou nodo da rede

O nodo o sensor de uma rede é composto pela integração do Arduino, Xbee e o sensor de temperatura DS18B20. A configuração do sistema é apresentada na FIGURA 47.

FIGURA 47 - NODO DA REDE

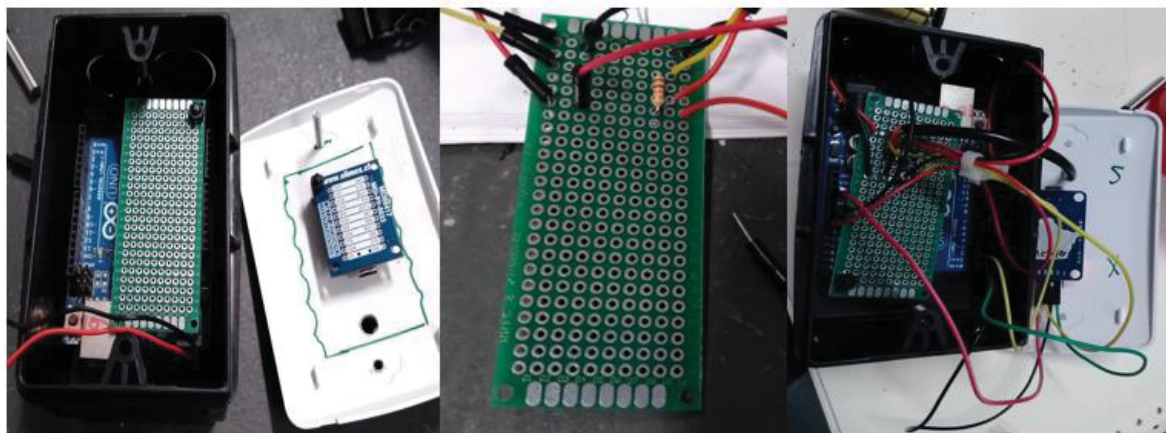


FONTE: O autor (2018)

O sistema sensor correspondente a cada nodo foi montado e adaptado numa caixa plástica de tomadas elétricas, fixada mediante parafusos de PVC e foi empregado um circuito impresso universal para gerar as conexões

necessárias. Existe um *led* guia que indica se o sistema está ligado ou desligado.

FIGURA 48 - NODO DA REDE API



FONTE: O autor (2018)

No caso do nodo da rede, a programação da biblioteca Xbee - Arduino TX, foi acrescentada para obter os valores de temperatura através do sensor DS18B20. Desta forma é gerado um conjunto de dados que contém os dados de temperatura e o endereço do modulo Xbee pertencente à rede desenvolvida, que são transmitidos ao coordenador da rede. Na FIGURA 49 são mostrados os nodos da rede e a identificação deles através dos últimos 4 dígitos de seu endereço. Nesta etapa foi acrescentado mais um nodo, ficando uma rede com 5 dispositivos.

FIGURA 49 - NODOS QUE COMPÕEM A REDE API



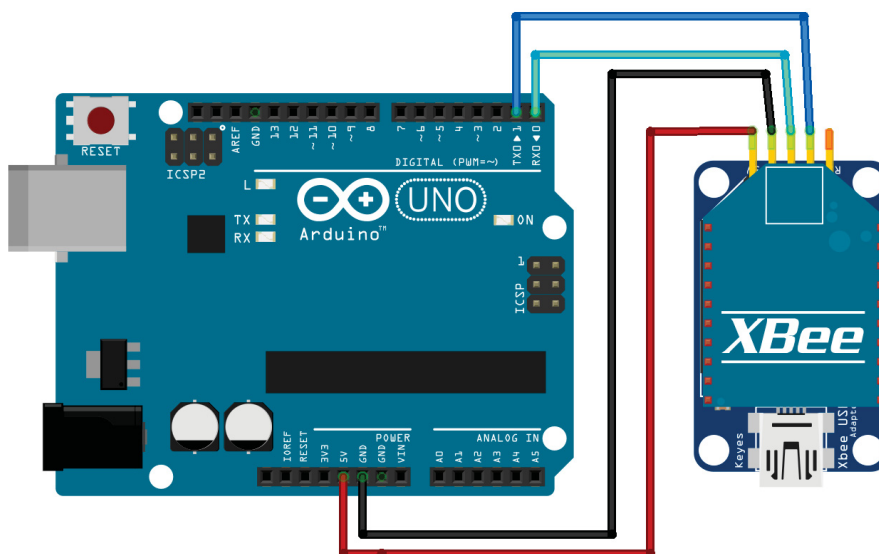
FONTE: O autor (2018)

Além da caixa que contém as conexões entre os diferentes elementos que compõem o nodo, foi construída uma estrutura que funciona como uma anteparo para evitar a incidência direta dos raios solares sobre o sensor de temperatura mediante uma cobertura plástica articulável que permite ser posicionada em diferentes posições conforme a disposição do sensor na área de trabalho.

### 3.2.5 Configuração do coordenador da rede

O coordenador da rede é composto por um modulo Xbee e um Arduino uno, Na FIGURA 50 é apresenta-se a conexão de ambos dispositivos. Neste caso a programação RX da biblioteca Xbee-Arduino foi acrescentada para receber os dados de temperatura dos nodos da rede.

FIGURA 50 - CONEXÃO ARDUINO - XBEE - COORDENADOR



FONTE: O autor (2018)

O coordenador da rede foi montado em uma caixa semelhante às descritas anteriormente, sendo também adicionado um *led* para indicar o estado ligado ou desligado do mesmo.

FIGURA 51 - COORDENADOR DA REDE

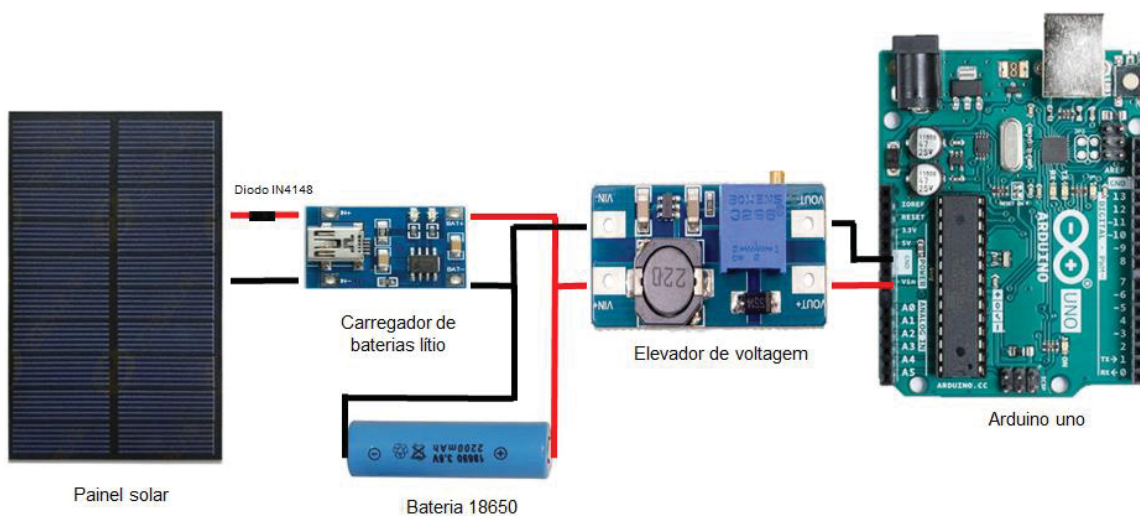


FONTE: O autor (2018)

### 3.2.6 Fonte de energia ou Alimentação dos sistemas

O nodo coordenador é conectado através de uma porta USB ao computador, sendo a sua energia fornecida diretamente através desta conexão. Já para os nodos, em função da sua característica de ser posicionado em diferentes posições no terreno, optou-se por uma alimentação baseada em painéis solares e baterias, sendo esta última usada como reserva caso ocorra alguma falha na alimentação proveniente dos painéis solares FIGURA 52.

FIGURA 52 - SISTEMA DE ENERGIZAÇÃO DOS NODOS DA REDE



FONTE: O autor (2018)



A configuração desta fonte de energia considera um painel solar de 5.5 volts, um diodo para direcionar a corrente só num sentido, um carregador de baterias de lítio, uma bateria de lítio e um elevador de voltagem para manter este parâmetro constante durante o tempo de uso do sensor. A energização do Arduino uno foi através do pino **Vin** o qual admite um voltagem de entrada entre 7 até 12 volts. A FIGURA 53 mostra o sistema de energização

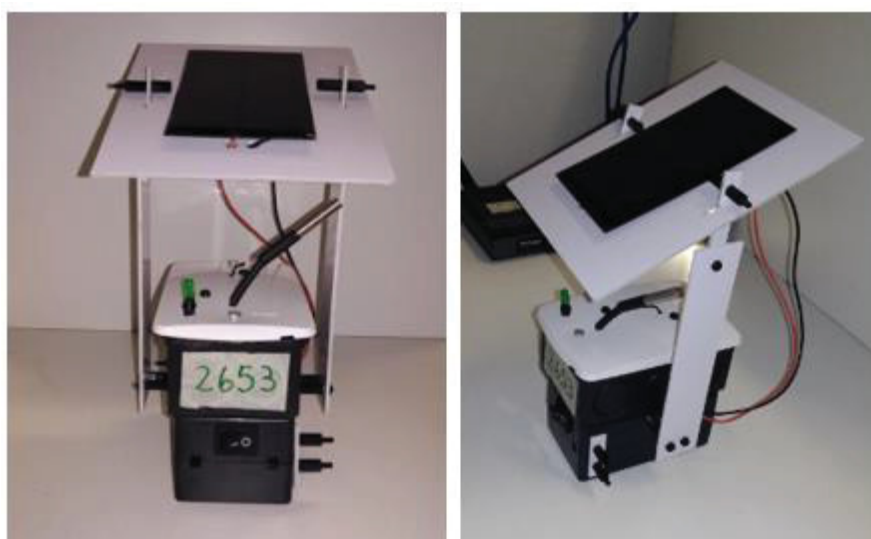
FIGURA 53 - CIRCUITO DE ENERGIZAÇÃO PARA O NODO DA REDE



FONTE: O autor (2018)

O sensor energizado pelo painel solar é apresentado na FIGURA 54.

FIGURA 54 - SENSOR COM PAINEL SOLAR

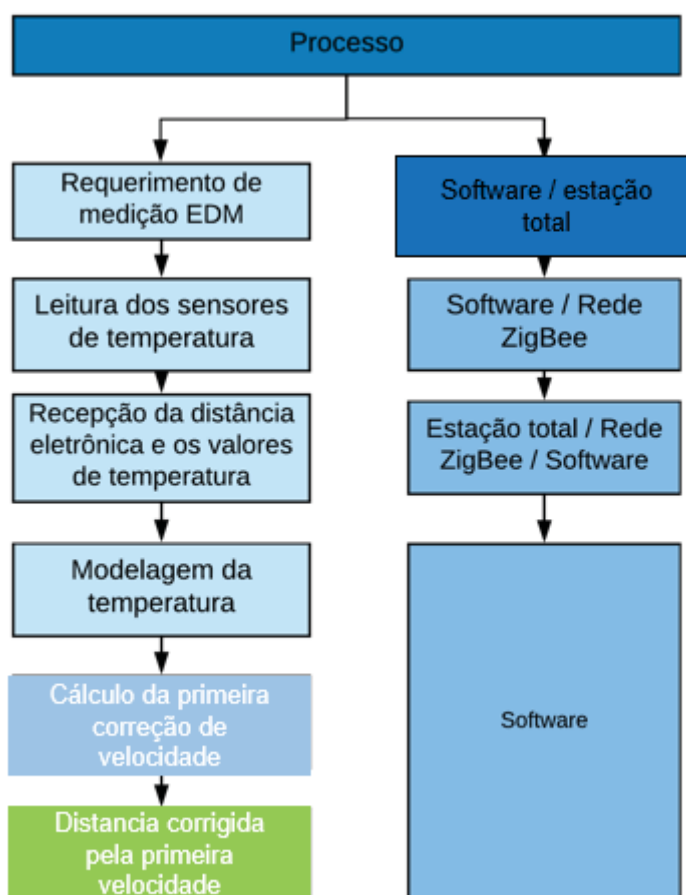


FONTE: O autor (2018)

### 3.3 INTEGRAÇÃO DOS SISTEMAS DE CONTROLE E AQUISIÇÃO

A integração dos sistemas foi feita com o objetivo de associar as temperaturas fornecidas pela rede descrita no ponto anterior, no processo de observação de distâncias mediante MED. O diagrama geral do funcionamento proposto e os elementos empregados em cada etapa são apresentados na FIGURA 55.

FIGURA 55 - DIAGRAMA DO FUNCIONAMENTO DO SOFTWARE



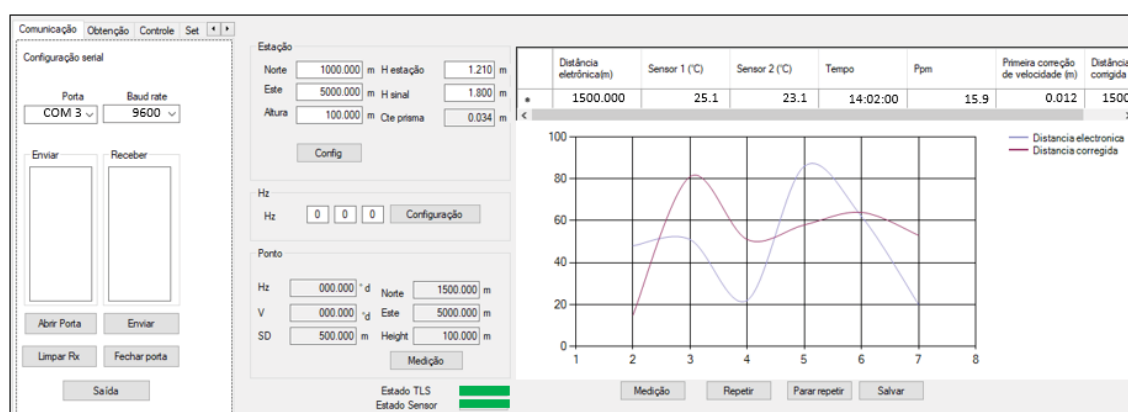
FONTE: O autor (2018)

O fluxo de trabalho definido para o novo *software* integra a rede de sensores desenvolvida permitindo que no instante que é feita a medição de distância em simultâneo sejam registrados valores de temperatura nos sensores. Na FIGURA 56 é mostrada a interface com os campos. As principais funções do *software* são:



- Conexão: na parte esquerda da janela é apresentada a configuração para a conexão da estação total com o computador, esta pode ser feita através de comunicação em serie ou através de Bluetooth, neste último caso é emulada uma porta serial virtual. Nesta interface é possível o envio de dados em formato bruto, ou seja, através de códigos de controle.
- Funções de topografia básica: as funções de topografia básica permitem o desenvolvimento de atividades associadas a levantamentos topográficos, como orientação do instrumento, definição de coordenadas, mudança do prisma, seleção de método de medição, controle do sistema servo-assistido. Para isto foram aplicadas as filtragens apresentadas no capítulo 3.1
- Funções associadas à pesquisa: neste caso a tabela da direita apresenta a medida da distância, das temperaturas medidas nos sensores e o horários das leituras. Também são apresentados os valores da correção calculada em ppm e em metros, bem como a distância corrigida. (Distância eletrônica, Sensor 1 e Sensor 2, TIME). E por último um gráfico para o monitoramento da distância eletrônica e corrigida

FIGURA 56 - JANELA DO SISTEMA INTEGRADO



FONTE: O autor (2018)

## 4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS:

Nesta pesquisa foram realizados diferentes experimentos com o objetivo de avaliar o funcionamento do sistema desenvolvido e mostrar o efeito da temperatura no cálculo da correção de primeira velocidade. Cada um destes testes será apresentado a seguir.

### 4.1 COMPARAÇÃO DE SENSORES DE TEMPERATURA DS18B20 E TMP36

O teste foi desenvolvido no laboratório de Física Experimental II da Universidade Federal do Paraná. Neste teste procura-se comparar a resposta dos sensores TMP36 (versão clássica) e DS18B20 para diferentes valores de temperatura induzidos através banho termostático (denominado popularmente de banho Maria) modelo NI1215 da firma NOVA, o qual permite esquentar uma solução líquida na faixa de 7°C até 100 °C. Os resultados foram comparados com termômetro utilizado no Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG) que tem uma precisão de 0,1 °C. Na FIGURA 57 – A é apresentado o equipamento para banho termostático usado neste teste.

FIGURA 57 – BANHO TERMOSTÁTICO

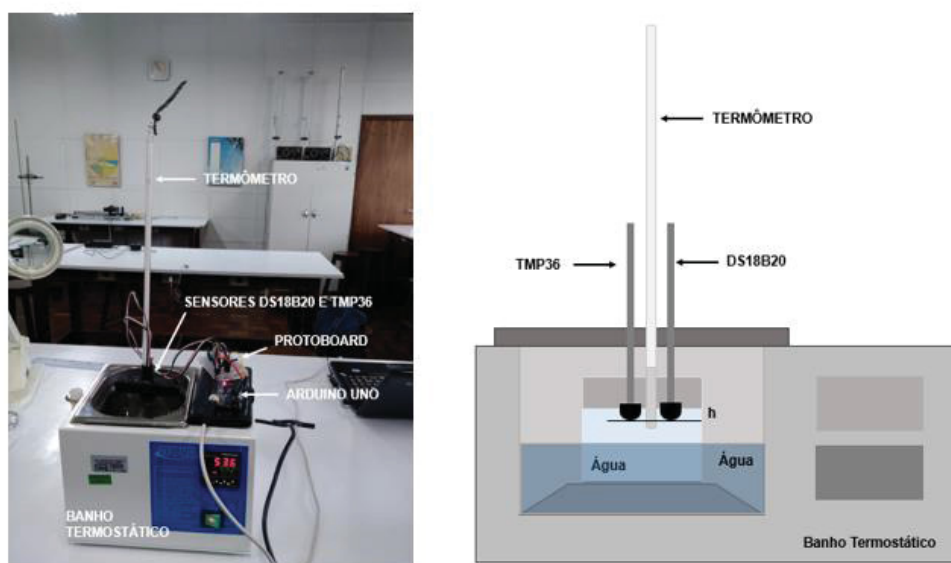


FONTE: O autor (2018)

Na FIGURA 57 – B, é apresentada cuba do banho, a qual contém a solução líquida, neste caso, além da cuba, é utilizado um copo de Béquer.

O experimento consistiu em na medição em paralelo dos sensores testados, mais as leituras efetuadas no termômetro usado como padrão de forma manual. Procurou-se as mesmas condições para os três dispositivos, portanto, eles foram montados num suporte que permitiu o mesmo contato com liquido usado, que para este experimento foi água. Na FIGURA 58 é apresentado a montagem empregada.

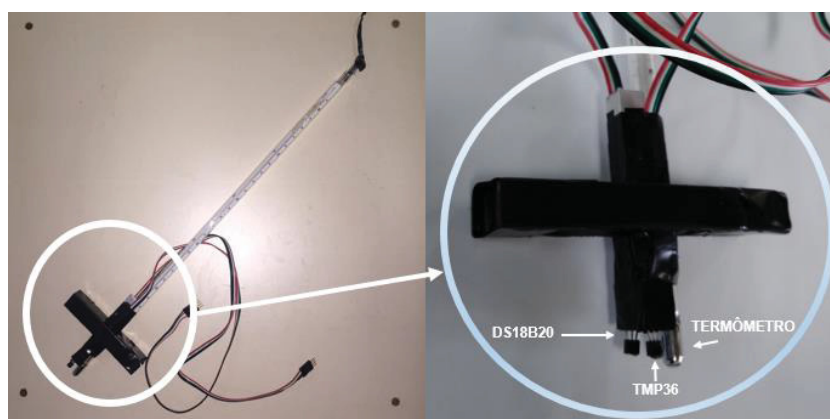
FIGURA 58 – SUPORTE PARA O TESTE DE COMPARAÇÃO SENSOR DS18B20, TMP36 E TERMÔMETRO PADRÃO



FONTE: O autor (2018)

A FIGURA 59 mostra o suporte para os sensores DS18B20, TMP36 e o termômetro.

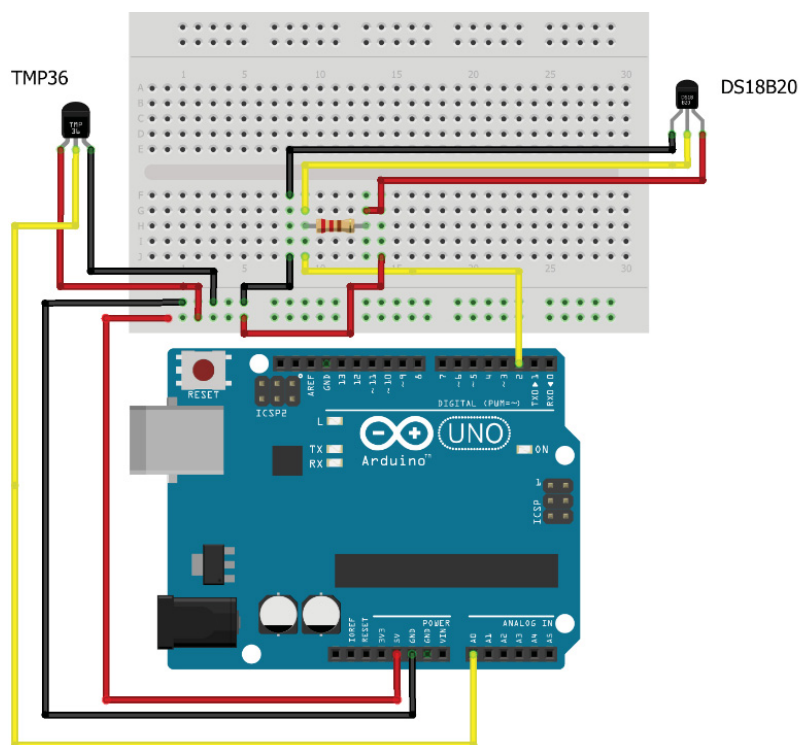
FIGURA 59 - SUPORTE TESTE PARA A COMPARAÇÃO DO SENSOR DS18B20, TMP36 E O TERMÔMETRO PADRÃO



FONTE: O autor (2018)

Como foi explicado anteriormente, com o objetivo de sincronizar as medições foi programado uma rotina para que as medições de ambos sensores fossem realizadas no mesmo instante, neste caso o intervalo de medição foi a cada 15 segundos. O circuito configurado é apresentado na FIGURA 60.

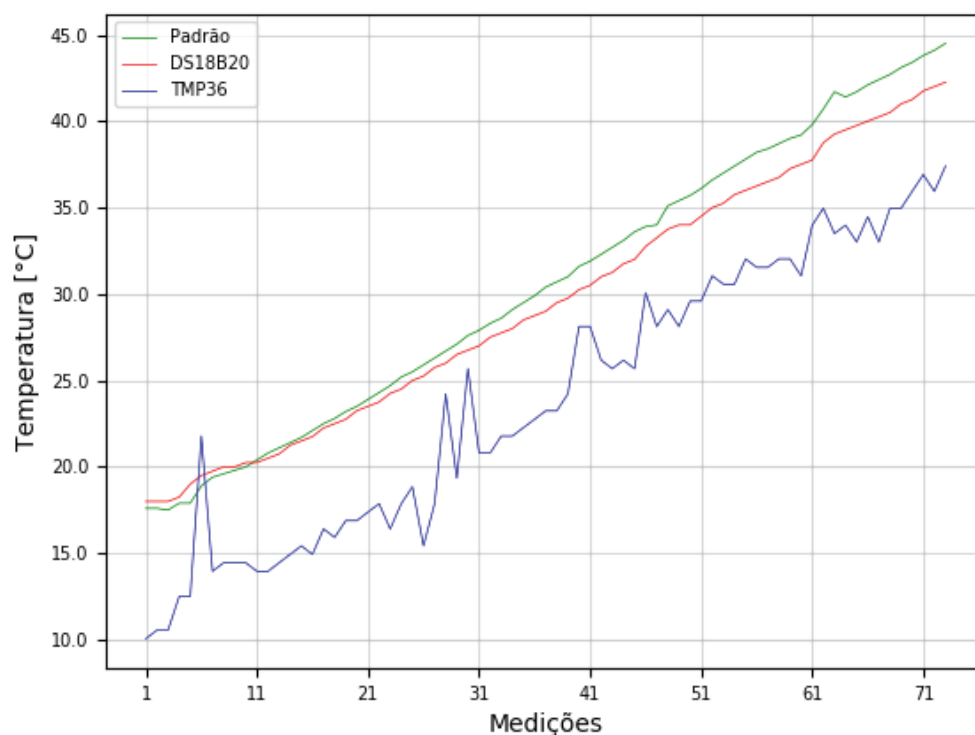
FIGURA 60 - CIRCUITO TESTE PARA A COMPARAÇÃO DO SENSOR DS18B20, TMP36 E TERMÔMETRO PADRÃO.



FONTE: O autor (2018)

O GRAFICO 2 apresenta os resultados dos sensores TMP36 e DS18B20, mais os valores obtidos através do termômetro escolhido como padrão.

GRAFICO 2 - EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO TESTE DE COMPARAÇÃO



FONTE: O autor (2018)

Para avaliar o resultado foi aplicado o teste estatístico chi quadrado, com um nível de significância do 5 %. O teste foi utilizado para avaliar a aderência entre os resultados dos sensores e o termômetro padrão. Os valores esperados (E) correspondem à leitura do termômetro padrão, os valores observados (O) correspondem à medições dos sensores TMP36 e DS18B20 e n corresponde ao número de elementos da mostra. O valores foram obtidos a partir de:

$$\chi^2_{estimado} = \sum_i^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (2.78)$$

O número de graus de liberdade neste teste corresponde ao número de variáveis aleatórias, envolvidas no cálculo da estatística, menos 1 (SOARES, 2005).

$$v = n - 1 \quad (2.79)$$

Onde:

n : número de elementos da mostra;

$v$ : número de graus de liberdade.

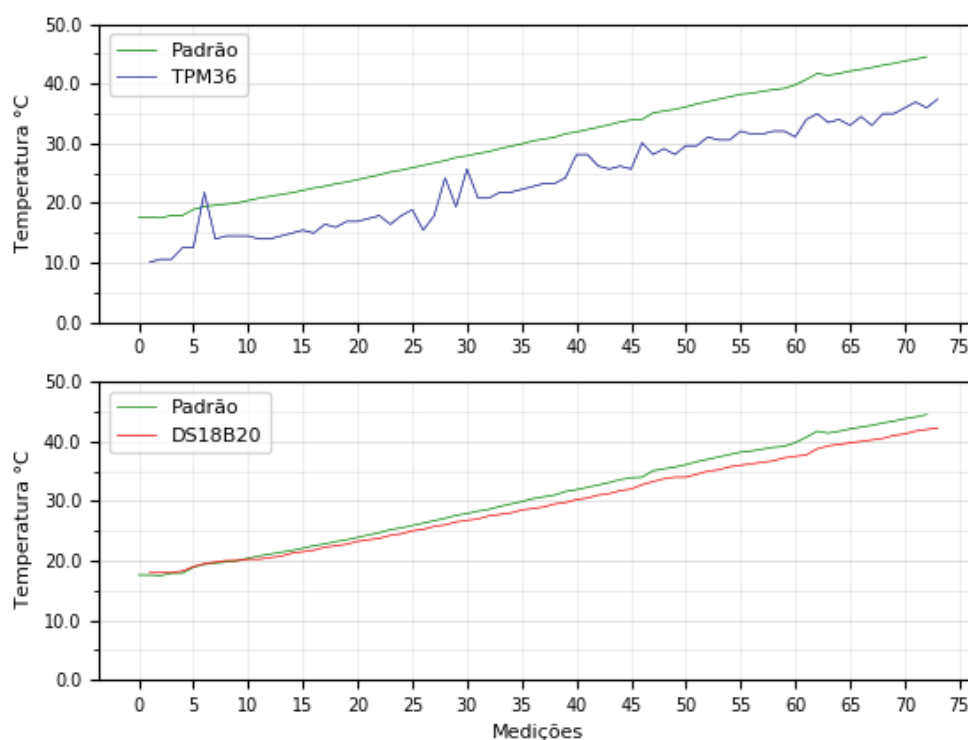
Neste experimento, foram geradas duas hipóteses:

$H_0$  = As mostras são homogêneas

$H_1$  = As mostras não são homogêneas

De acordo com Soares (2005), “quando  $\chi^2 = 0$ , as frequências observadas e esperadas concordam exatamente e quando  $\chi^2 > 0$ , não existe concordância entre as variáveis. Quanto maior o valor de  $\chi^2$ , maior será a diferença entre elas e menor será a aderência entre os valores observados e esperados.” As diferenças de temperatura para cada sensor são apresentadas no GRAFICO 3.

GRAFICO 3 - DIFERENÇAS DE TEMPERATURA PARA CADA SENSOR



FONTE: O autor (2018)

A TABELA 11 apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação do teste do  $\chi^2$ . De esquerda para a direita são apresentados: os sensores, os graus de liberdade, o valores de  $\chi^2$  estimado é o valor critico de  $\chi^2$ .

TABELA 11 - TESTE CHI QUADRADO PARA SENSORES DS18B20 E TMP36

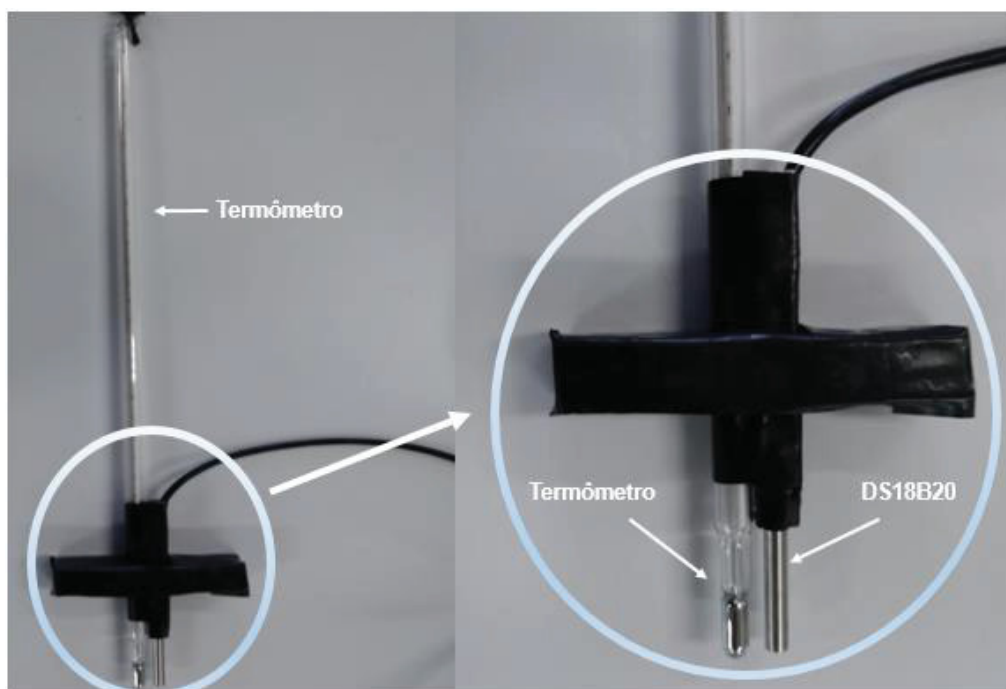
Sensor	v	$\chi^2$ Estimado	$\chi^2$ Critico
TMP36	72	114,908	47,85772
DS18B20	72	3,488	47,85772

FONTE: O autor (2018)

Dos resultados obtidos no teste é possível concluir uma melhor aderência dos resultados obtidos com o sensor DS18B20 em comparação aos resultados obtidos com o sensor TMP36, isto é evidenciado através da hipóteses  $H_0$ , a qual para o sensor DS18B20 foi aceita, entretanto para o sensor TMP36 foi rejeitada. Com base nos resultados obtidos neste teste estatísticos foi escolhido como uma melhor opção para o desenvolvimento deste trabalho o sensor DS18B20.

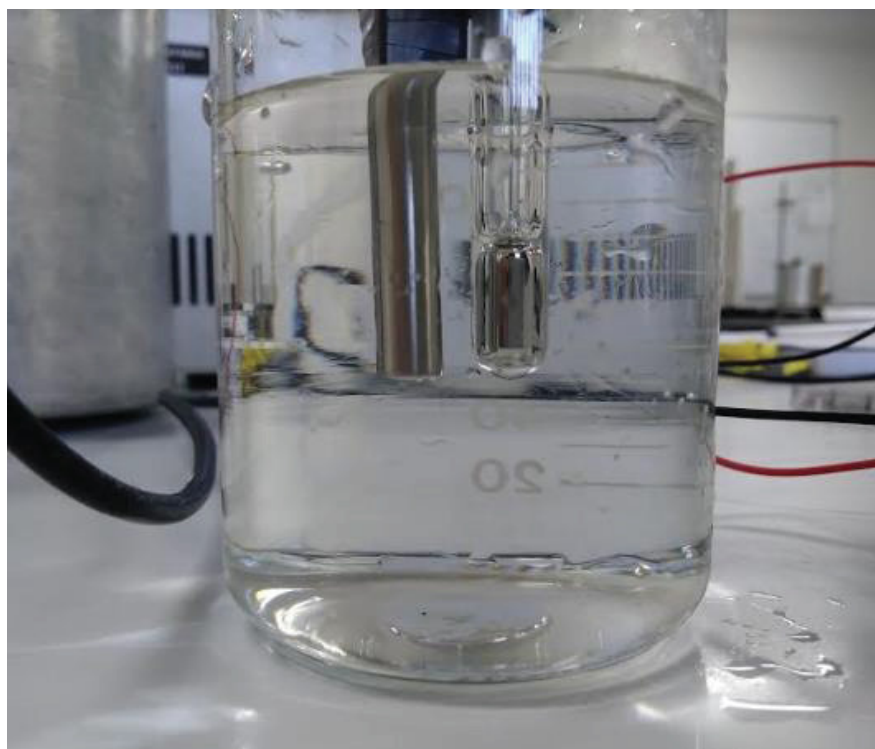
Finalmente foi realizado um teste para avaliar a resposta do sensor DS18B20 para líquidos com o termômetro padrão, a principal diferença que este tem é o encapsulamento que permite submergi-lo na água. A escolha deste sensor para o desenvolvimento da pesquisa baseia-se na possibilidade de operar com diferentes condições climáticas, sem diminuir sua capacidade. O teste considerou a mesma configuração feita na comparação do TMP36 e DS18B2. A FIGURA 61 apresenta o suporte para o sensor DS18B20 e o termômetro padrão. Enquanto na FIGURA 62 é apresentada a posição do termômetro e sensor no copo de água.

FIGURA 61 – SUPORTE PARA O TESTE DE COMPARAÇÃO DO SENSOR DS18B20 E TERMÔMETRO PADRÃO



FONTE: O autor (2018)

FIGURA 62 – SENSOR DS18B20 E TERMÔMETRO PADRÃO

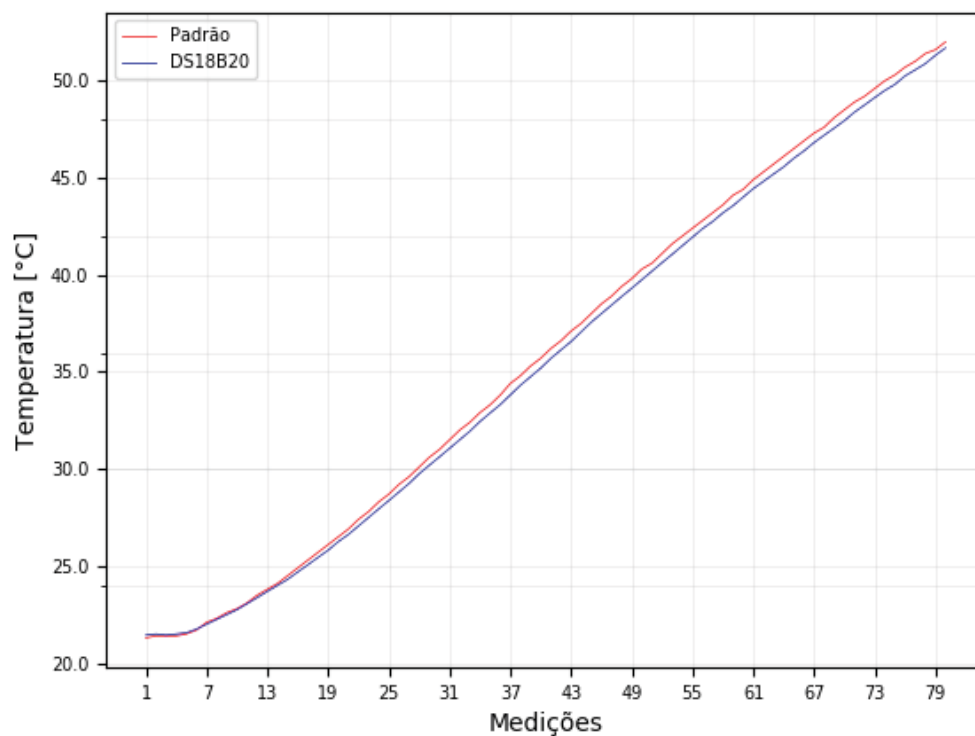


FONTE: O autor (2018)



As diferenças de temperatura são apresentadas no GRAFICO 4.

GRAFICO 4 - COMPARAÇÃO DS18B20 E PADRÃO



FONTE: O autor (2018)

Da mesma forma que no teste anterior foi aplicado o teste estatístico do  $\chi^2$ , os resultados deste são apresentados na TABELA 12.

TABELA - 12 TEST CHI QUADRADO PARA O TESTE DO SENSOR DS18B20

Sensor	v	$\chi^2$ Estimado	$\chi^2$ Crítico
DS18B20	78	0,346	51,91045

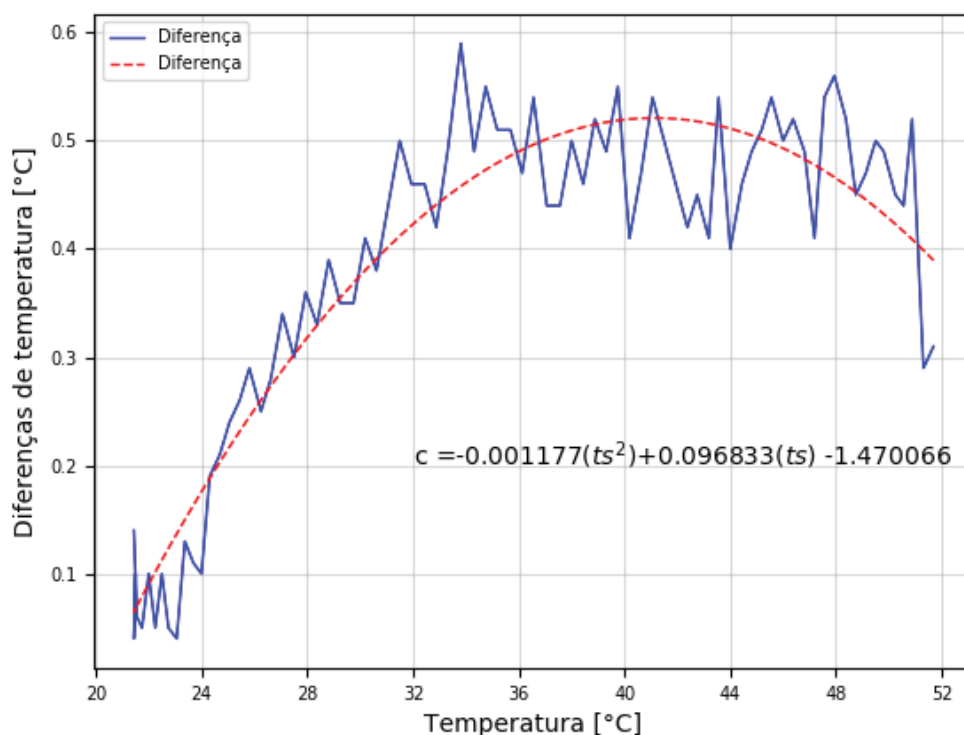
FONTE: O auto (2018)

Neste teste a hipóteses  $H_0$  é aceita, portanto a curva de valores obtida a partir das medições do sensor DS18B20 são homogêneas em comparação ao sensor padrão.

## 4.2 FUNÇÃO DE CALIBRAÇÃO PARA O SENSOR 18650

A partir da diferença de temperatura entre o termômetro padrão e o sensor DS18B20, obteve-se a função calibração para o sensor DS18B20 através do ajustamento de um polinômio de grau 2, o Gráfico 5 apresenta as diferenças e o polinômio ajustado:

GRAFICO 5 - CALIBRAÇÃO SENSOR DS18B20



FONTE: O autor (2018)

Finalmente a função de calibração é:

$$T_c = T_s + 0,001177T_s^2 + 0,096833T_s - 1,470066 \quad (2.80)$$

Onde:

$T_c$  = Temperatura corrigida

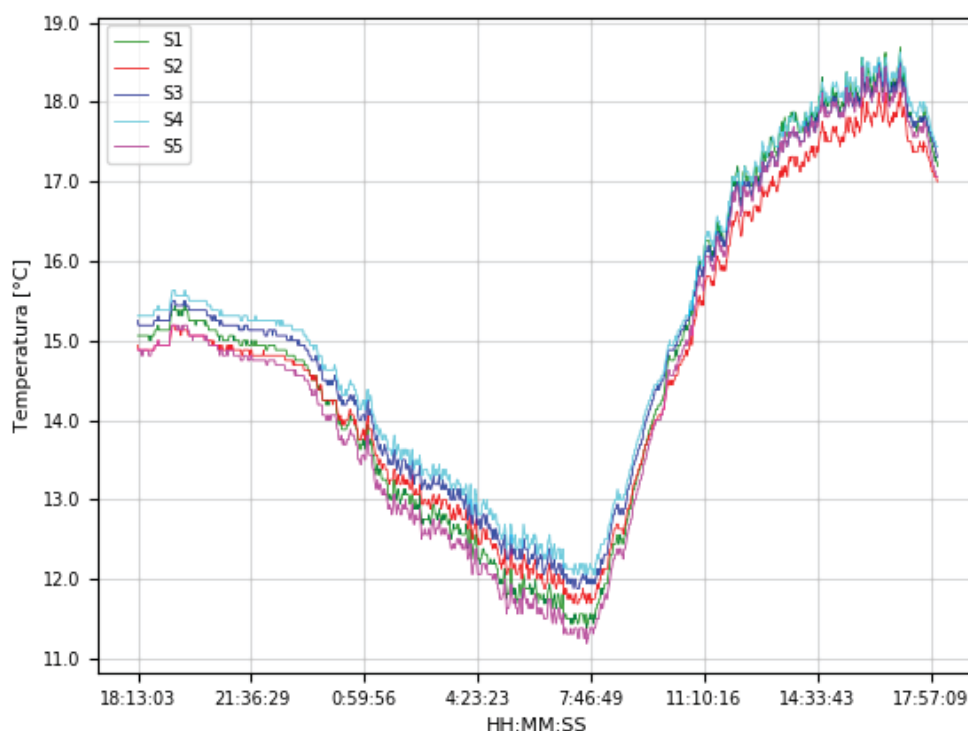
$T_s$  = Temperatura sensor DS18B20

### 4.3 RESPOSTAS DOS SENSORES 18650

Foi realizado um teste com os cinco sensores com o objetivo de avaliar a resposta de cada um deles referentes aos valor de temperatura apresentado. O teste foi feito entre os dias 13-07-2018 e 14-07-2018 com medições cada 1 minuto no Laboratório de Instrumentação Geodésica. O Laboratório teve seu funcionamento normal no período, já que a ideia do teste foi comparar relativamente os sensores. Foram realizadas aproximadamente 24 horas de observação.

Os resultados do teste são apresentados no GRÁFICO 5, mostrando a temperatura informada por cada sensor durante o período. Cada sensor foi identificado no gráfico com S1 até S5, respectivamente.

GRÁFICO 6 - TEMPERATURA 5 SENSORES DS18B20



FONTE: O autor (2018)

Os resultados mostram que as temperaturas têm a mesma tendência no intervalo do teste. As variações de temperatura durante o experimento

oscilaram entre 11 °C até 19°C aproximadamente. As diferenças nas temperaturas fornecidas pelos sensores são apresentadas na TABELA 13

TABELA - 13 TESTE DE RESPOSTA PARA 5 SENSORES DS18B20

Mínimas e máximas diferenças [°C]	S1		S2		S3		S4		S5	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
s1			0,0	0,6	0,0	0,6	0,0	0,7	0,1	0,3
s2					0,1	0,4	0,3	0,6	0,0	0,5
s3							0,0	0,3	0,0	0,8
s4									0,1	0,9

FONTE: O autor (2018)

Em geral, as maiores diferenças estão na precisão do sensor. Embora existam valores acima desta, estes representam uma percentagem inferior das séries temporais.

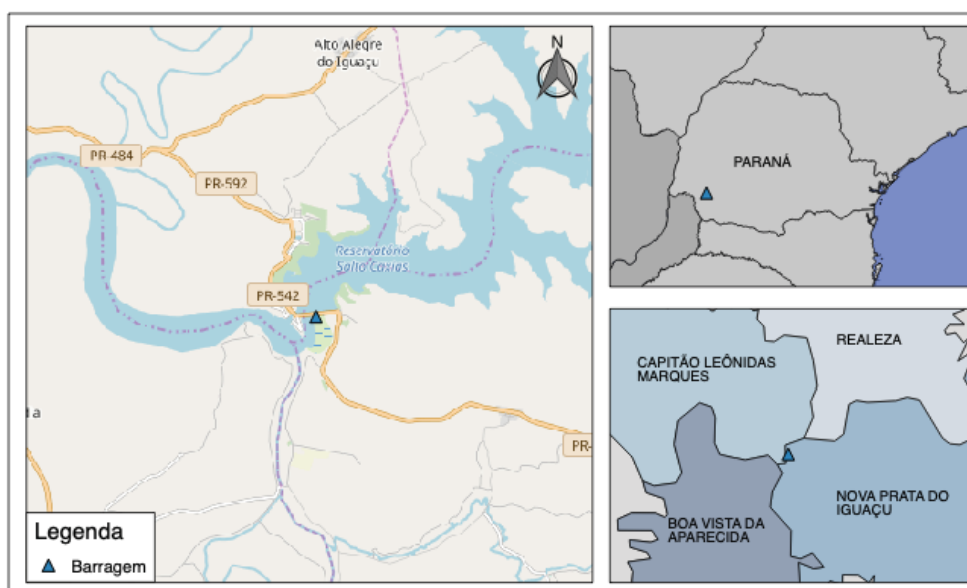
#### 4.4 EXPERIMENTOS EM CAMPO.

Estes experimentos têm dois objetivos principais: o primeiro é testar a utilização do sistema multiponto de coleta de informações de temperatura desenvolvido e o segundo é justamente avaliar o comportamento da temperatura no entorno de uma estrutura real considerando diferentes locais de interesse no monitoramento Geodésico realizado com o uso de estações totais. Para isto realizou-se dois experimentos em duas barragens que dispõem de redes de monitoramento geodésico: as barragens de Salto Caxias e Mauá, ambas localizadas no estado do Paraná.

##### 4.4.1 Usina de Salto Caxias

A primeira área de estudo corresponde à usina Hidrelétrica de Salto Caxias, localizada entre os municípios de Capitão Leônidas Marques e Nova Prata do Iguaçu, a 650 km de Curitiba (FIGURA 63)

FIGURA 63 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA USINA DE SALTO CAXIAS



FONTE: O autor (2018)

Na FIGURA 64 é apresentada uma fotografia panorâmica da usina e barragem de Salto Caxias.

FIGURA 64 – USINA E BARRAGEM SALTO CAXIAS

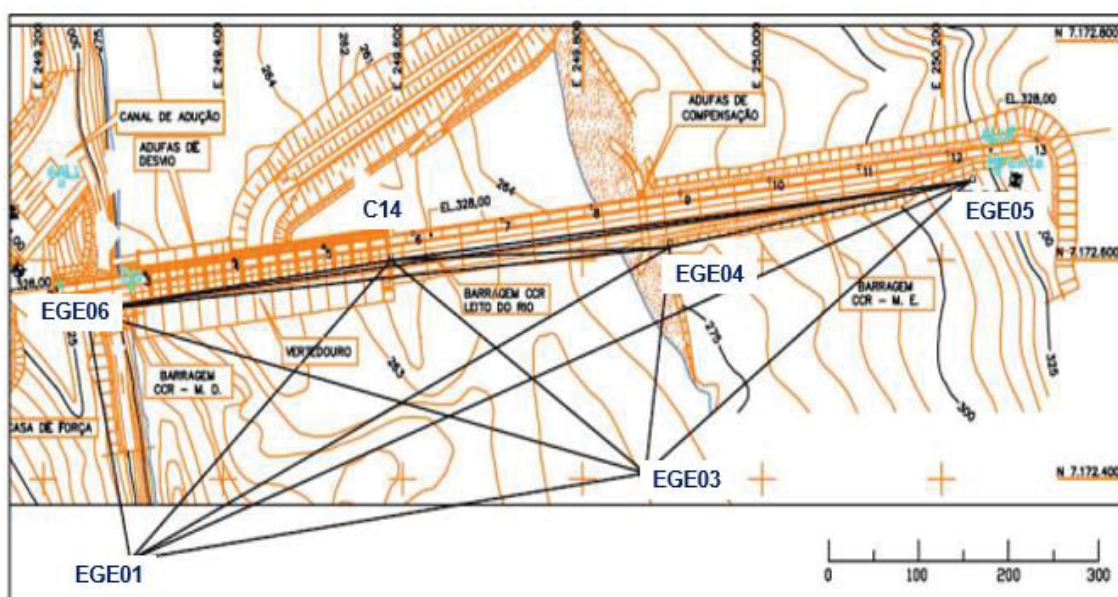


FONTE: Adaptado de Copel (2018)

Nesta Usina existe uma rede geodésica externa de monitoramento da barragem composta por seis pilares de centragem forçada (pontos fixos) e diversos prismas espalhados na face a montante da mesma (pontos objeto). Além disto, existe uma rede interna de monitoramento, utilizada para a leitura de pontos existentes nas galerias de inspeção da Usina. Maiores detalhes

podem ser encontrados em Granemann (2005) e Zocolotti (2005). Buscou-se aplicar os sistemas sensores em situações reais de medição durante uma campanha de coleta de dados, realizada no dia 11 e 12 de setembro do 2018. O primeiro experimento foi desenvolvido usando como referência o controle geodésico das galerias da barragem o qual é feito mediante a observação de uma poligonal com estação total. A FIGURA 65 apresenta a rede de controle externa da barragem de Salto Caxias a qual está composta por 6 pilhares de centragem forçada e um pino na crista da barragem

FIGURA 65 - REDE DE CONTROLE EXTERNA SALTO CAXIAS



FONTE: Adaptado de Suci (2012)

A medição interna das galerias é feita a partir da observação de uma rede com base nos pontos de controle externos. Na FIGURA 66, a posição do ponto EGE05 permite a conexão de ambas as redes através da observação ao ponto EG21 que corresponde à estação geodésica interna mais próxima ao exterior da galeria. Para esta conexão, instala-se a estação total no ponto EGE05, faz-se pontaria de ré no ponto EGE04 (distância inclinada de 116 metros aproximadamente) e pontaria de vante no ponto EG21 (37 metros aproximadamente). Assim, tem-se observações de distância que são feitas no ambiente externo, na conexão, no ambiente interno, que apresentam diferentes temperaturas.

Na FIGURA 66 é apresentada a configuração das galerias da barragem:

FIGURA 66 - REDE DE CONTROLE INTERNA, BARRAGEM SALTO CAXIAS

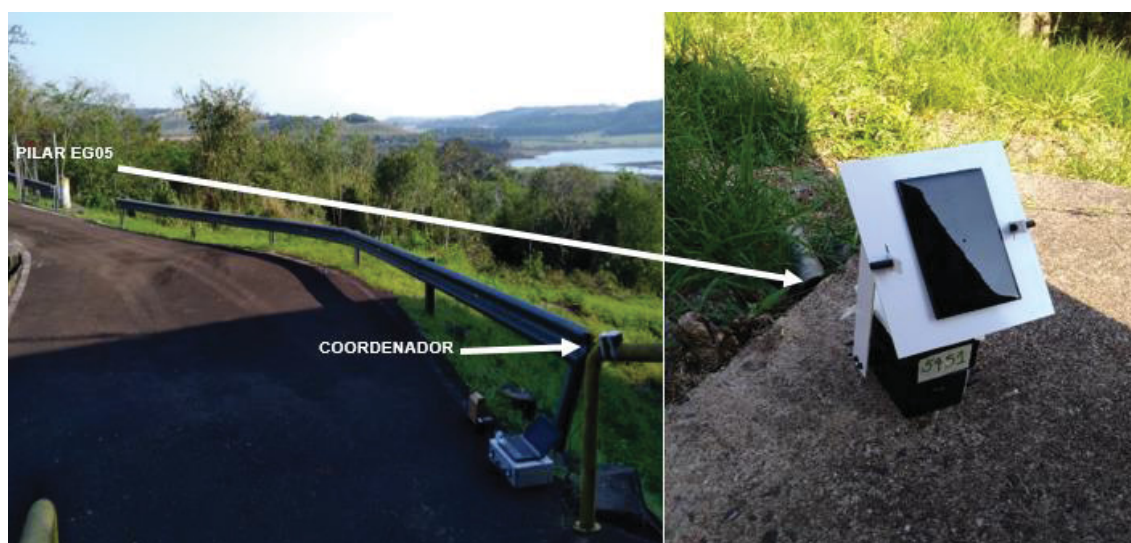


FONTE: Adaptado de Zocolotti (2018)

O objetivo deste experimento é mostrar as variações de temperatura no interior e exterior da barragem e como isto pode afetar as observações da rede. Para isto foram instalados sensores no pilar EGE04 (sensor S5455), EGE05 (sensor S5451) e EGI21 (sensor S6579). A distribuição dos sensores são apresentados na FIGURA 67, FIGURA 68 e FIGURA 69 são apresentadas as instalações feitas.



FIGURA 67 - VISTA DO PILAR EGE05, SENSOR DE TEMPERATURA E COORDENADOR DA REDE DE MONITORAMENTO



FONTE: O autor (2018)

FIGURA 68 – VISTA DO PILAR EGE04, COORDENADOR DA REDE DE MONITORAMENTO DE TEMPERATURA E INGRESO DA GALERIA



FONTE: O autor (2018)



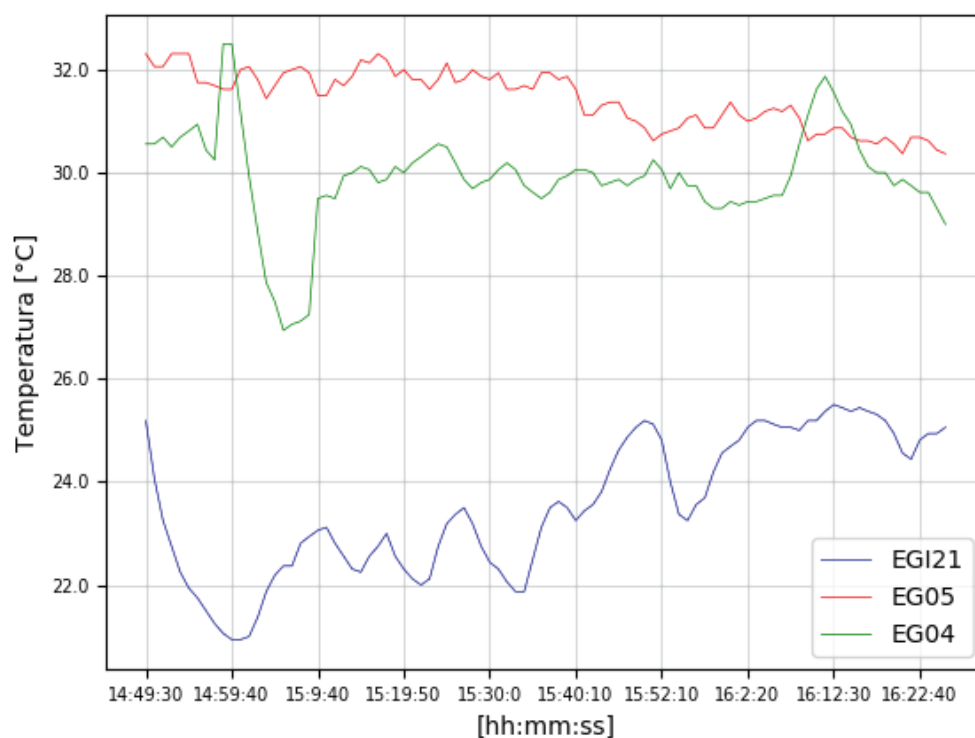
FIGURA 69 – SENSORES DE TEMPERATURA E COORDENADOR DA REDE NA ENTRADA DA GALERIA DA BARRAGEM SALTO CAXIAS



FONTE: O autor (2018)

As temperaturas coletadas ao mesmo tempo nestes pontos são apresentadas em forma de gráfico (GRÁFICO 7). Os dados foram coletados num período de 1,5 horas aproximadamente.

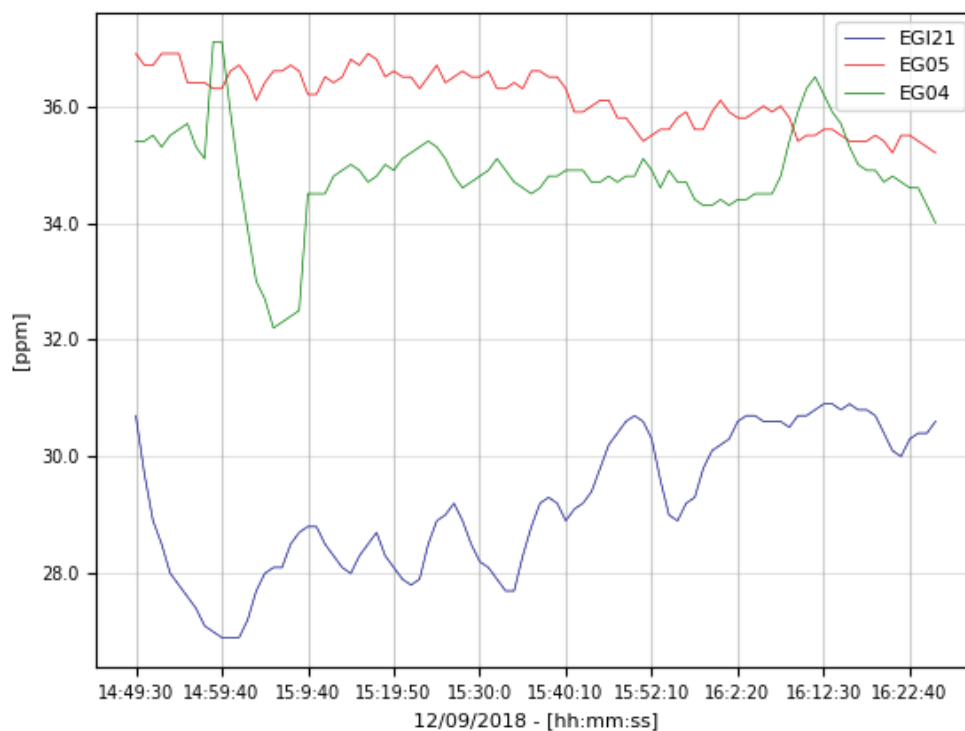
GRÁFICO 7 – TEMPERATURA PONTO DA REDE EXTERNA E INTERNA DA BARRAGEM SALTO CAXIAS



FONTE: O autor (2018)

A máxima diferença de temperatura entre os sensores S6579 com S5451 e S5455 foi de aproximadamente 9°C e 12°C respectivamente. Analisou-se então qual seria a diferença na correção de primeira velocidade (em ppm) de uma leitura da distância efetuada com as temperaturas individuais observadas nos três pontos. Considerando-se uma pressão e umidade constante na área onde ficam os três pontos, foram calculadas correções de primeira velocidade em EGE04, EGE05 e EGI21, os resultados são apresentados no GRÁFICO 8.

GRÁFICO 8 – VARIAÇÃO DA CORREÇÃO PPM



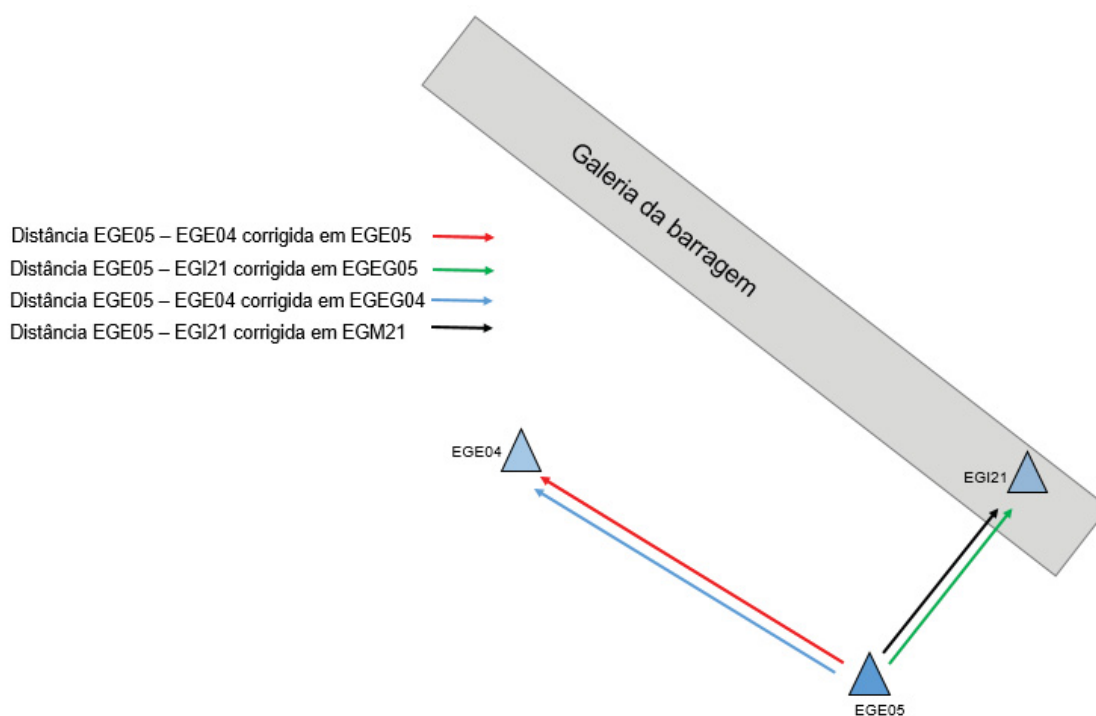
FONTE: O autor (2018)

De acordo ao GRÁFICO 8, nos três locais têm-se diferentes valores de correção. Assim considerando apenas uma temperatura para gerar a correção tem-se as seguintes configurações:

- Distância EGE05-EGE04 corrigida com base na temperatura observada no pilar EGE05;
- Distância EGE05-EGE04 corrigida com base na temperatura observada no pilar EGE04;
- Distância EGE05-EGI21 corrigida com base na temperatura observada no pilar EGE05;
- Distância EGE05-EGI21 corrigida com base na temperatura observada no pilar EGI21.

Na FIGURA 70 são apresentadas as quatro distâncias possíveis.

FIGURA 70 - DISTÂNCIAS POSSÍVEIS ENTRADA GALERIA USINA SALTO CAXIAS



FONTE: O autor (2018)

O segundo experimento foi realizado considerando as atividades de monitoramento dos pontos (primas) posicionados na face a jusante da barragem de Salto Caxias, o qual é feito desde o pilar EGE03 mediante o uso de uma estação total. Procurou-se apresentar o comportamento da temperatura no entorno da barragem e como este torna-se importante para a determinação precisa dos possíveis deslocamentos dos prismas à jusante. Foram usados os cinco sensores de temperatura que compõem o sistema de aquisição desenvolvido. Estes foram instalados no pilar EGE03 e no entorno linha de prismas monitorados a jusante. A FIGURA 71 mostra a distribuição dos sensores. A distância aproximada do ponto EGE03 ao prismas e aos sensores é de aproximadamente 280 metros.

FIGURA 71 – LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA NA BARRAGEM DE SALTO CAXIAS



FONTE: O autor (2018)

A FIGURA 72 apresenta dois dos sensores dispostos na barragem de Salto Caxias.

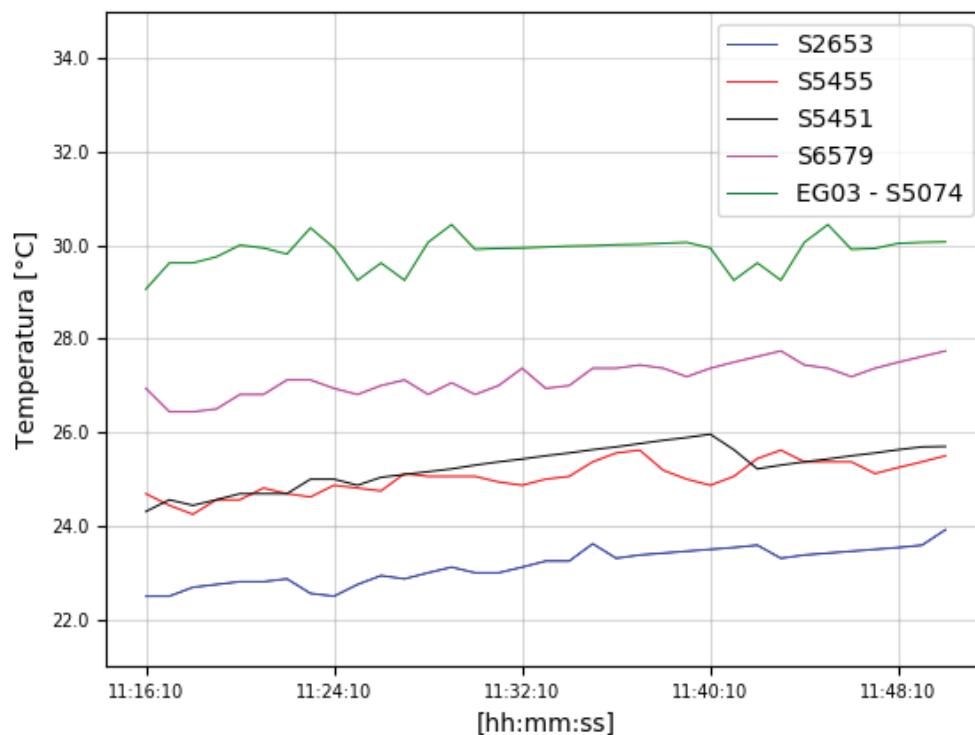
FIGURA 72 – SENSORES DE TEMPERATURA NA BARRAGEM SALTO CAXIAS



FONTE: O autor (2018)

O GRAFICO 9 apresenta as temperatura obtidas a partir das medições dos 5 sensores em forma simultânea.

GRAFICO 9 - TEMPERATURA SIMULTANEAS DE 5 SENSORES

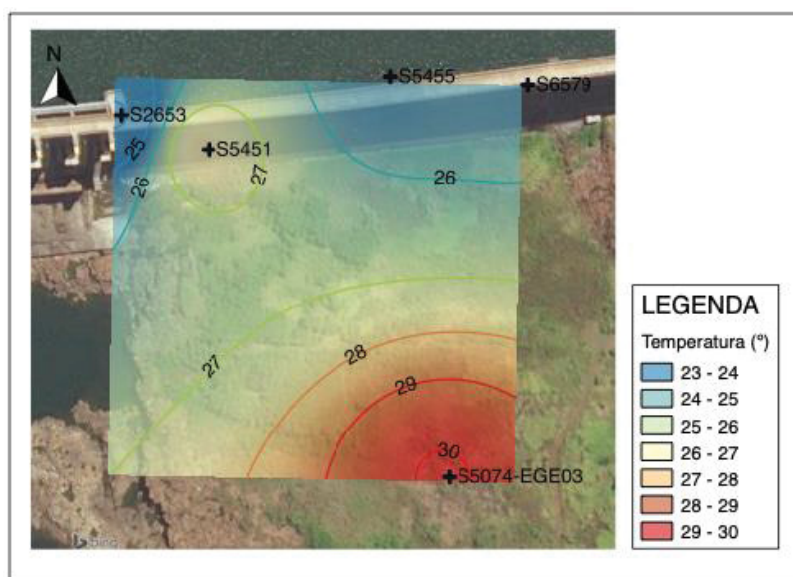


FONTE: O autor (2018)

Com os dados fornecidos pelos sensores foi possível desenvolver um modelo interpolado de temperatura para estimar o comportamento deste parâmetro na área estudada (FIGURA 73).



FIGURA 73 - MAPA INTERPOLADO DE TEMPERATURAS



FONTE: O autor (2018)

O modelo foi calculado para um conjunto de 5 observações instantâneas à 11h50min10s do dia 11 de setembro do 2018. A interpolação calculada apresenta o comportamento esperado da temperatura, ou seja, existe uma diminuição com o aumento da altura onde estão os sensores, embora o gradiente térmico não apresente um valor típico ( $-0,65^{\circ}\text{C}$  cada 100 metros segundo Torge (2001)) em relação à altura da barragem, a qual é aproximadamente 70 metros. As diferenças de temperatura entre o Pilar EGE03 e os prismas de monitoramento sobre a jusante podem chegar até 5 graus (GRAFICO 9) o que pode evidenciar gradientes irregulares e microclimas na região.

Um análise pode ser feita para a temperatura no pilar EGE03, a qual pode ser causa de um microclima térmico gerado pela irradiação de temperatura da estrutura, a irradiação da superfície abaixo do pilar e a posição deste último, a qual pode ser definida com uma região encapsulada termicamente pela conformação da topografia local e da estrutura adjacentes. Na FIGURA 74 são apresentados dois perfis nos quais procurou-se mostrar o comportamento térmico na posição de EGE03.

FIGURA 74 - DISTRIBUIÇÃO DOS PERFIS DE TEMPERATURA



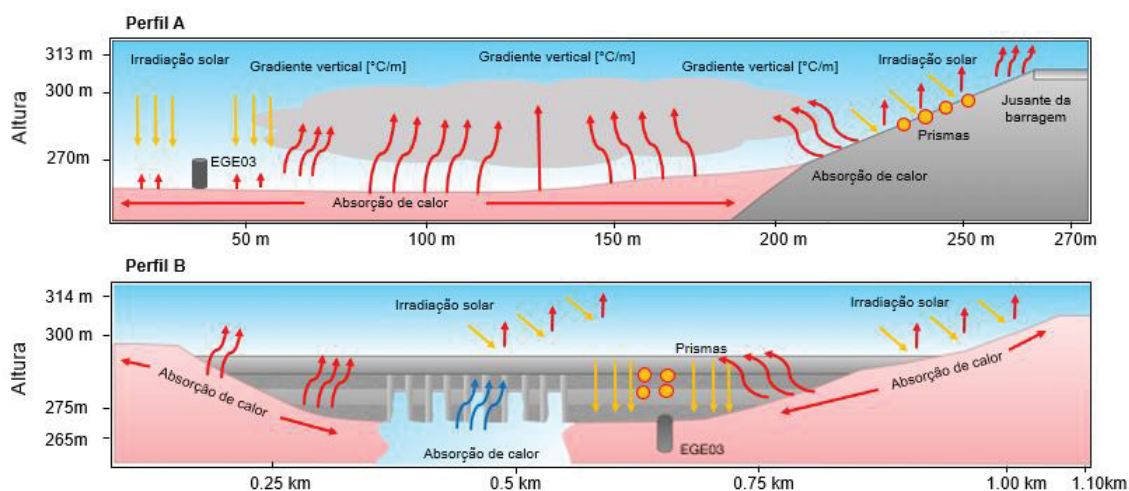
FONTE: O autor (2018)

O perfil vermelho (A) e azul (B) são esquematizados na FIGURA 75, nestes são apresentadas diferentes os diferentes elementos que podem ter uma influência na temperatura medida no Pilar EGE03. Este encontra-se num local de solo exposto, numa espécie de vale, próximo ao leito do rio e de solo rochoso. Observando-se no sentido a jusante do rio, ao seu lado direito tem-se uma face exposta de rocha escavada e a esquerda vegetação nativa, na sua maioria pequenos arbustos e árvores de porte médio.

A radiação de calor da barragem pode gerar gradientes verticais irregulares devido à diferente capacidade de absorção e emissão do calor, o que provoca gradientes térmicos em diferentes direções. No caso específico do pilar EGE03 este localiza-se numa região limitada pelos elementos mencionados anteriormente, que estão mais elevados gerando um encapsulamento de temperatura em sua posição.



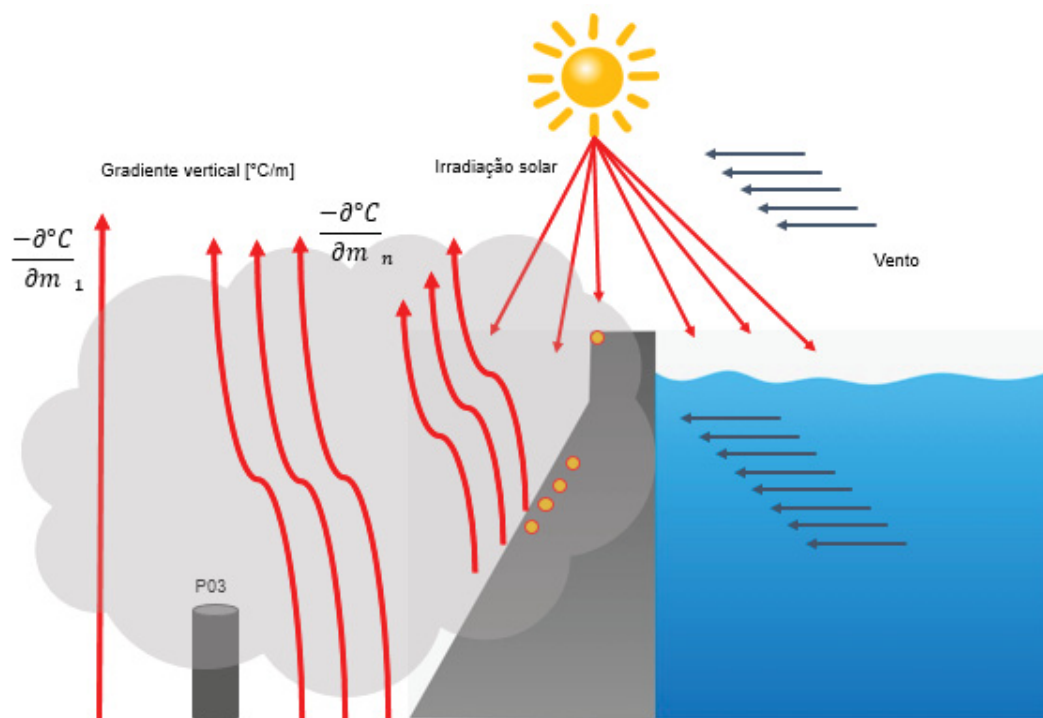
FIGURA 75 - COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA NA NO PILAR EGE03.



FONTE: O autor (2018)

No caso dos prismas de monitoramento na jusante eles ficam a uma altura maior que o Pilar EGE03, portanto a temperatura já varia de acordo ao gradiente vertical. Além disso, a temperatura gerada pela barragem altera a temperatura em um valor que não é constante, este depende da radiação solar a qual é função da hora do dia. A massa de água contida no reservatório também afeta a temperatura na região, portanto são gerados diferentes gradientes térmicos em função da altura da estrutura e do seu entorno. Pontos na crista da barragem ainda estão sujeitos a ventos que podem conduzir o ar que está sobre a massa de água na direção dos mesmos, sendo que a massa de ar tem temperatura influenciada pela temperatura da superfície da água (FIGURA 76).

FIGURA 76 – ELEMENTOS QUE INFLUENCIAM A TEMPERATURA NOS PRISMAS DE MONITORAMENTO

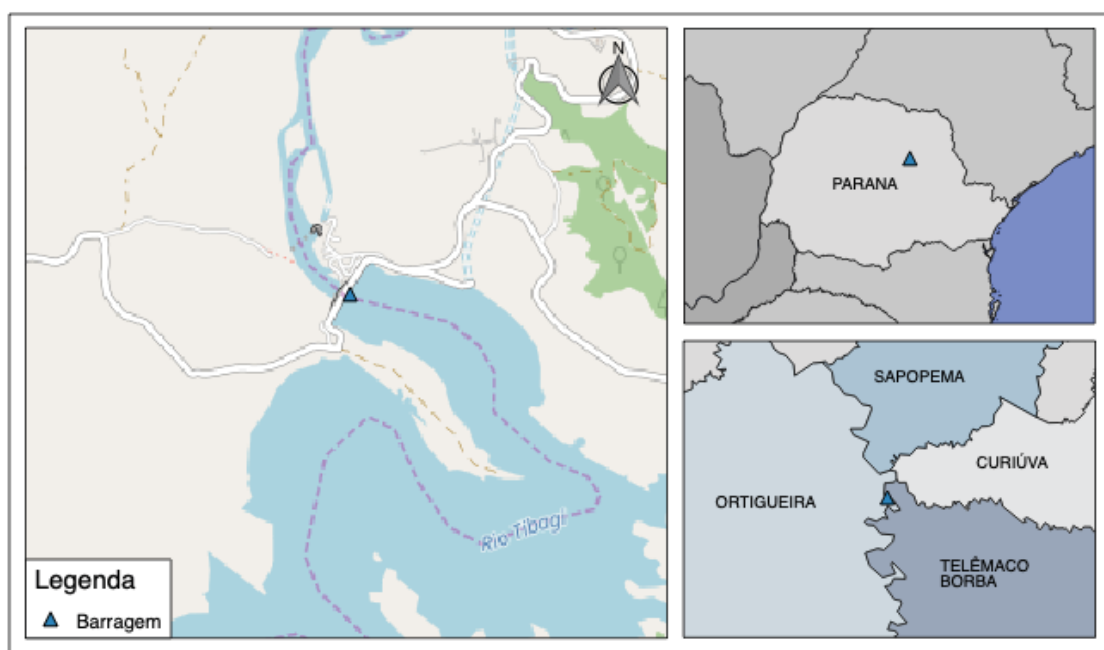


FONTE: O autor (2018)

#### 4.5 USINA DE MAUÁ

A usina hidroelétrica de Mauá está localizada entre os municípios de Telêmaco Borba e Ortigueira no cause do rio Tibagi (FIGURA 77). A barragem (FIGURA 78) da hidroelétrica é monitorada periodicamente mediante diferentes técnicas de posicionamento Geodésico, as quais são sequencialmente integradas com o objetivo de obter possíveis deslocamentos de pontos de interesse.

FIGURA 77 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA USINA DE MAUA



FONTE: O autor (2018)

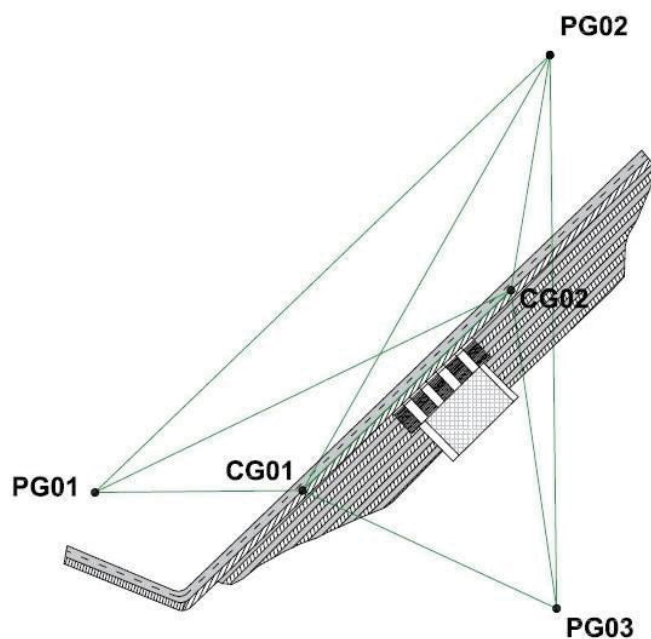
FIGURA 78 – BARRAGEM DA USINA DE MAUÁ



FONTE: O autor (2018)

A rede de monitoramento da barragem da usina de Mauá é composta por cinco pontos de controle. Três dos pontos são materializados com pilares de concreto com dispositivos de centragem forçada e os dois pontos mediante dispositivos de centragem forçadas engastados na estrutura na crista da barragem. A FIGURA 79 mostra a rede de monitoramento Geodésico de Mauá.

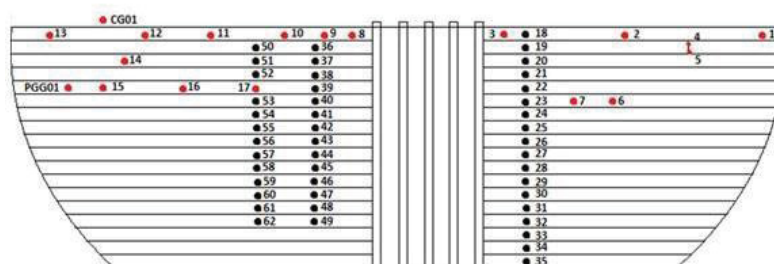
FIGURA 79 - REDE DE MONITORAMENTO DA BARRAGEM DE MAUÁ



FONTE: O autor (2018)

Além dos pontos de controle da rede, existem 62 prismas fixos à jusante da barragem (FIGURA 80), os quais são monitorados a partir do pilar PG03 mediante irradiação tridimensional (FIGURA 81).

FIGURA 80 - PRISMA ACIMA DA BARRAGEM DE MAUÁ

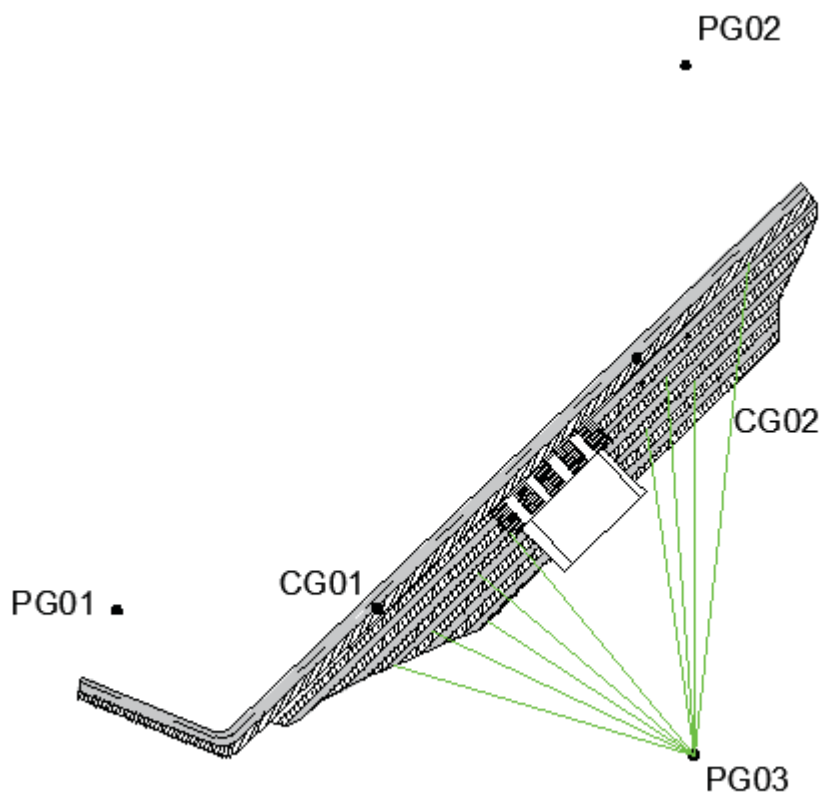


FONTE: O autor (2018)

O monitoramento de pontos da face a jusante é feito empregando-se uma estação *Leica TS15* com  $\pm 1^\circ$  de precisão angular e  $\pm 1\text{mm} + 1,5 \text{ ppm}$  de

precisão linear. No processo de monitoramento por irradiação tridimensional são executadas pelo menos 8 series de observação aos prismas.

FIGURA 81 - MONITORAMENTO DOS PRISMAS ACIMA DE BARRAGEM



FONTE: O autor (2018)

Para cada distancia observada são aplicadas as correções de primeira velocidade. Os parâmetros atmosféricos de pressão (p) e temperatura (t) são medidos na posição PG03 e a temperatura é fixada num 60% para todas as observações. Correção de primeira velocidade pode ser obtida a partir de:

$$\Delta D_1 = \left( 286,34 - \left[ \frac{0,29525 \cdot p}{(1 + \alpha \cdot t)} - \frac{4,126 \cdot 10^4 \cdot h}{(1 + \alpha \cdot t)} \cdot 10^x \right] \right) \cdot d' \quad (2.81)$$

Onde:

$\Delta D_1$  = primeira correção de velocidade [ppm];

$d'$  = distancia eletrônica;

$p$  = pressão atmosférica [mbar];

$t$  = temperatura [°C];

$h$  = umidade relativa [%];

$\alpha = 1/273,15$ ;

$x = (7,5 * t/(237,3 + t)) + 0,7857$

Com o objetivo de obter valores de temperatura na região de observação foi empregado o sistema de aquisição apresentado no capítulo 3.2. Três dos sensores que compõem o sistema foram instalados em diferentes posições de interesse no local onde é feito o monitoramento da barragem. O sensor S2653 foi instalado no pilar PG03 e os outros dois nos pontos de monitoramento PM04 (S5455) e PM59 (S5074), ambos na face da jusante. A distância aproximada entre os pontos PG03-PM04 é 394,289 m e PG03-PM59 é 232,391m e o desnível é 37,968m e 13,286m respectivamente.

Na FIGURA 82 são apresentadas as localizações dos sensores na jusante da barragem.

FIGURA 82 - LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA NA BARRAGEM DE MAUÁ

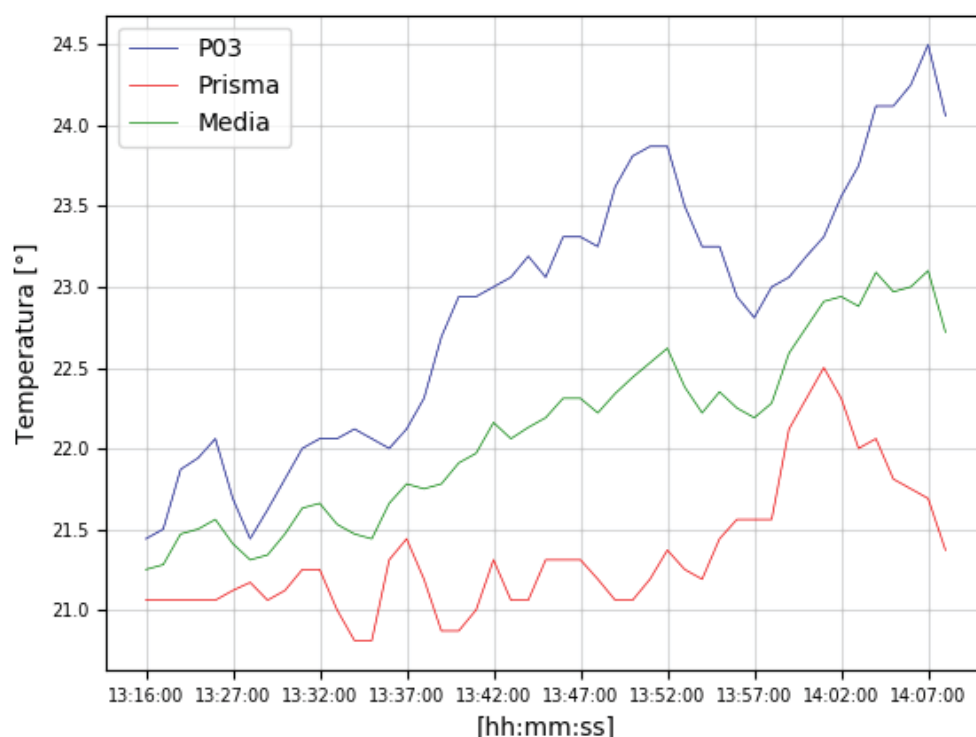


FONTE: O autor (2018)

#### 4.5.1 Resultados

A temperatura foi medida em paralelo a um ciclo de observações do monitoramento da barragem de Mauá. Os valores obtidos em PG03 e PM04 através dos sensores S2653 e S5074 e a média deles são apresentados no GRÁFICO 10. Os mesmos parâmetros entre PG03 e PM50 são apresentados no GRÁFICO 11.

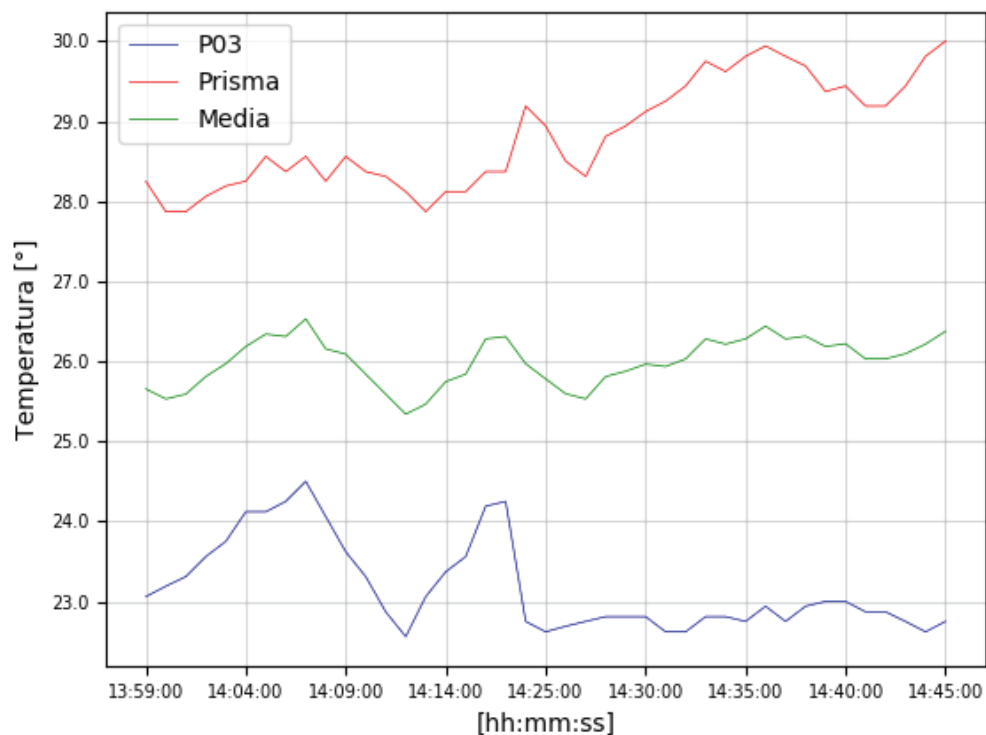
GRÁFICO 10 - TEMPERATURA DOS SENSORES DE TEMPERATURA NA BARRAGEM DE MAUÁ



FONTE: O autor (2018)



GRÁFICO 11 - TEMPERATURA DOS SENSORES DE TEMPERATURA NA BARRAGEM DE MAUA

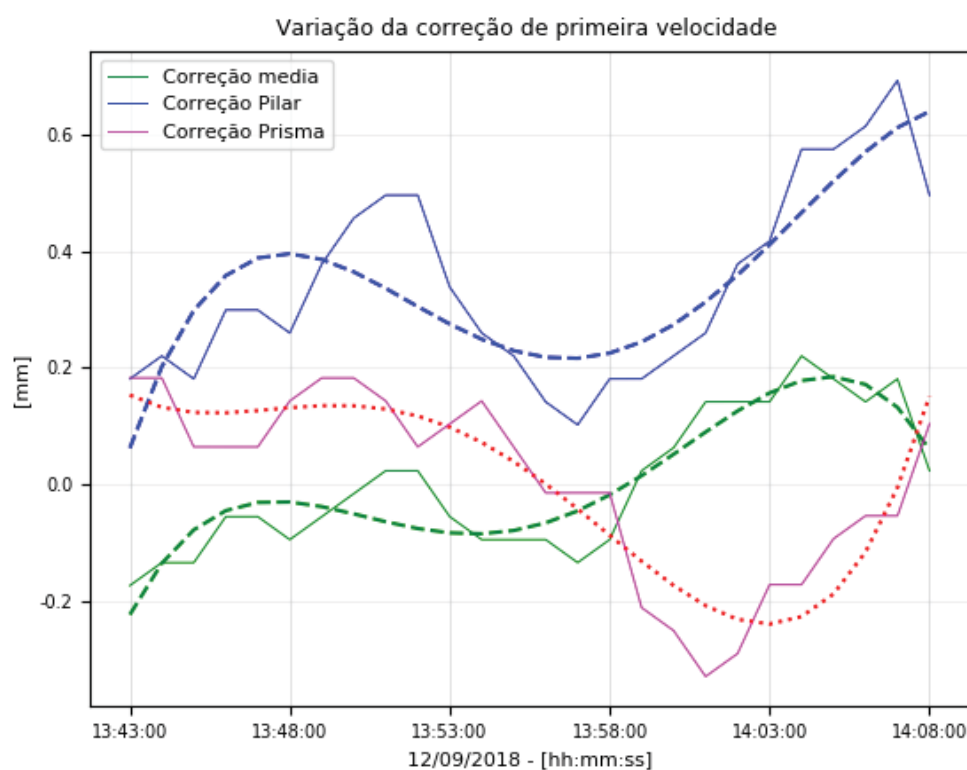


FONTE: O autor (2018)

A distância eletrônica entre PG03 – PM04 foi corrigida pela primeira velocidade de acordo ao modelo apresentado na EQUAÇÃO 2.80. Para isto foram gerados três cenários. Os dois primeiros foram obtidos calculando a correção de primeira velocidade no PG03 e PM04. Em ambos casos a pressão foi medida no local de PG03, a umidade foi fixada no valor de 60% e a temperatura foi obtida pelos sensores S2653 e S5074 respectivamente. O terceiro cenário foi obtido a partir da correção média de primeira velocidade entre PG03 e PM04 (M0403). Os resultados para esta correção são apresentados no GRÁFICO 12.



GRÁFICO 12 – MAGNITUDE DE CORRECAO DE VELOCIDADE P03-PM04.

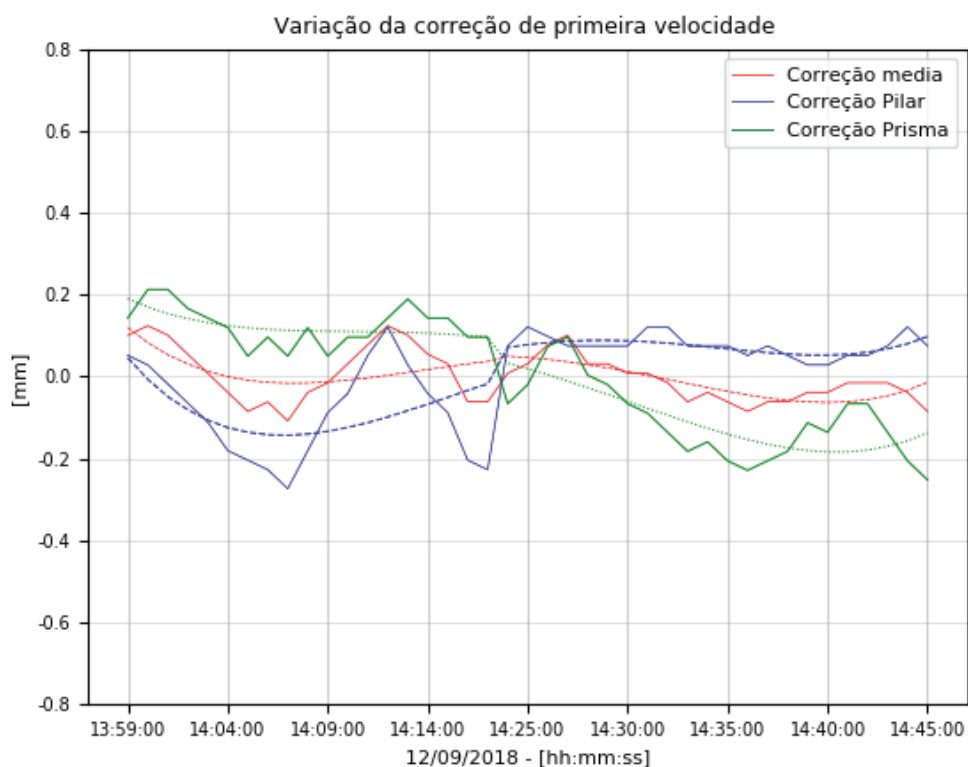


FONTE: O autor (2018)

Os resultados obtidos a partir do cálculo da primeira correção de velocidade de acordo os cenários gerados mostram que a máxima diferença entre os valores de correção de primeira velocidade são 0,6 mm em PG03, enquanto para o PM04 a máxima diferença é 0,5 mm. Finalmente o valor médio M0403 apresento uma diferença máxima de 0,3 mm.

Os mesmos cenários foram gerados para a observação PG03 - PM59. As correções de primeira velocidade obtidas para PG03, PM59, M5903 são apresentadas no GRÁFICO 13.

GRÁFICO 13 - MAGNITUDE DE CORRECAO DE VELOCIDADE P03 – PM59



FONTE: O autor (2018)

Para a distância PG03–PM59 a máxima diferença de valores na correção PG03 é 0,4mm, para PM59 0,5 mm e para o valor médio M5903 a máxima diferença é 0,2 mm.

A primeira correção de velocidade foi aplicada à média das distancias medidas entre PG03-PM04 e PG03-PM59 considerando as correções de velocidade em PG03, M5903, M0403. Foi obtida a média e o desvio padrão para cada distancia calculada. Os resultados são apresentados na TABELA 14.

TABELA 14 – DISTÂNCIA E PRECISÃO DAS DISTÂNCIAS CORRIGIDAS PELA PRIMEIRA VELOCIDADE

Linha Base	PG03		M5903		M0403	
	Distância	Precisão	Distância	Precisão	Distância	Precisão
PG03 – PM59	232,3914 m	0,9 mm	232,3919 m	0,8 mm	394,2598 m	1,0 mm
PG03 – PM04	394,201 m	1,1 mm				

FONTE: O autor (2018)

Em ambos casos as distancias medias apresentam uma melhor precisão.

## 5 CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido apresenta considerações relativas à automação de levantamentos Geodésicos na área de monitoramento de estruturas através do desenvolvimento de um *software* para o controle de estações totais e a integração de uma rede de sensores desenvolvidos levando em consideração o conceito de hardware e *software* de código aberto.

O objetivo era apresentar um sistema que permitisse automatizar a correção de primeira velocidade, a qual é aplicada para distancias obtidas mediante medidores eletrônicos de distância MED. Esta correção é uma função de constantes fixas e dos parâmetros ambientais, de pressão, umidade e temperatura, sendo este último o que gera maior incerteza na determinação desta correção. Neste contexto foi desenvolvido um *software* para o controle de estações totais, o qual permitiu obter distâncias em diferentes corrigidas dos efeitos da primeira correção de velocidade com base a observações de temperatura em estações multiponto. Em paralelo foi automatizada a coleta de dados de temperatura através de uma rede de sensores construída mediante de plataformas de código aberto, como Arduino, Xbee e sensores temperatura de baixo custo.

Os primeiros resultados são relacionados com a infraestrutura desenvolvida qual é analisada em duas etapas; primeiro, o protocolo GeoCom da *Leica* permitiu programar rotinas para realizar atividades comuns de levantamentos topográficos, mediante códigos de controle fornecido pela empresa, sendo possível controlar o sensores angulares e distanciômetro eletrônico, além de realizar a configuração destes. Nesta etapa foi possível obter a distância eletrônica configurando o intervalo de observação e a configuração da do tipo de prisma utilizado. Numa segunda instância uma rede de sensores de temperatura forneceu dados em tempo real e em paralelo à observação distancias, portanto foi possível fazer automação, integração e cálculo da primeira velocidade. O protocolo de comunicação por radiofrequência ZIGBEE através dos módulos Xbee permitiu o envio em tempo real dos dados de temperatura. Nos testes desenvolvidos o protocolo Zigbee foi usado até uma distância de 400 metros aproximadamente com um funcionamento correto.

A placa Arduino foi empregada para controle do sensor DS18B20 e do modulo Xbee. Mediante esta plataforma foi possível capturar os dados de temperatura fornecidos pelo sensor, para posteriormente gerar um pacote de informação compatível com o formato de comunicação API de Zigbee.

Tanto o protocolo de comunicação de *Leica GeoCOM* quanto a rede de sensores de temperatura, desenvolvida mediante elementos programáveis de código aberto, permitiram abordar a automação proposta nesta pesquisa. No caso do monitoramento Geodésico de estruturas foi possível coletar de forma automatizada e em tempo real valores de temperatura para aplicar a primeira correção de velocidade durante uma campanha de monitoramento Geodésico.

Os testes feitos em laboratório permitiram avaliar a resposta dos sensores TMP36 e DS18B20, com relação a um termômetro padrão, para isto foram comparadas temperaturas em diferentes intervalos, como resultado o sensor DS18B20 apresentou uma curva de comportamento mais próxima ao padrão utilizado como referência e também uma solução mais estável. O segundo teste de laboratório procurava avaliar a resposta dos cinco sensores DS18B20 que compõem a rede. Os resultados para 24 horas de medição mostraram uma curva de comportamento com diferenças esperadas de acordo à precisão fornecida pelo fabricante, portanto, os sensores que compõem a rede tem o mesmo nível de confiabilidade.

Nos testes feitos na usina de Salto Caxias, foi usado o sistema desenvolvido o qual foi avaliado em relação a seu funcionamento, os quais apresentam resultados positivos; no primeiro teste foi possível determinar as diferenças de temperatura entre os pontos da rede Geodésica que conectam o exterior (EGE04 e EGE05) e interior desta (EGI21). Com esta informação foi possível calcular a correção atmosférica num ponto interior da galeria e em outros dois pontos no exterior evidenciando uma diferença em seus valores, a qual é proporcional às diferenças temperatura obtida mediante os sensores. Considerando que neste teste os valores de pressão não apresentaram diferenças entre as locações, enquanto a umidade no monitoramento foi fixada em 60%. Os resultados mostram que neste caso é possível obter até quatro diferentes distancias, dependendo do arranjo das temperaturas para o cálculo da correção, portanto é necessário abordar a determinação de um valor de

temperatura ideal que permita obter uma correção de primeira velocidade mais representativa.

O segundo experimento realizado na usina Salto Caxias aborda a modelagem da temperatura para efetuar o cálculo das correções atmosféricas e obter um valor de correção de primeira velocidade mais representativo. O resultado principal foi modelagem interpolada de temperatura na região onde é feito o monitoramento à jusante da barragem. Através do uso do sistema de aquisição de temperatura se determinaram diferenças nos extremos dos limites de interpolação obtidos pelos sensores, observada através do mapa de temperatura interpolada. Embora o gradiente de temperatura tenha o comportamento esperado, ou seja, diminui com a altura, este apresenta um valor diferente que o teórico.

No caso do monitoramento da usina de Mauá foram realizados diferentes experimentos com o objetivo obter a correção de primeira velocidade de duas linhas visadas, o primeiro mediante correções com dados atmosféricos no local onde foi instalada a estação total e foram realizadas as séries de monitoramento dos prismas a jusante da barragem. O segundo foi obtido a partir da medição da temperatura no junto ao prisma de monitoramento (pressão medida no pilar de monitoramento e umidade fixa). Os resultados das correções para ambas visadas apresentaram diferenças proporcionais as variações de temperatura nos extremos da linha. Portanto é necessário considerar a variação deste parâmetro na correção da primeira velocidade. Neste contexto foi calculada a correção de primeira velocidade nos extremos da linha visada e posteriormente foi obtida a média entre ambos os valores.

Os resultados mostram que o valor da correção de primeira velocidade média apresenta uma menor dispersão nos dados, portanto uma correção mais estável no tempo. Neste sentido a correção média estabeleceu nestes estudos de caso uma melhor estimativa para efetuar a primeira correção de velocidade.

Tanto os testes de campo feitos na usina de Salto Caxias e em Mauá apresentam resultados que permitem iniciar estudos sobre a presença de microclimas térmicos no monitoramento das duas barragens. No contexto da pesquisa desenvolvida, um sistema que automatiza a coleta de dados de temperatura fornece a possibilidade de fazer uma modelagem e estimar dados para uma correção de velocidade mais representativa e precisa, visando

diminuir as incertezas nos valores associadas nos erros sistemáticos na determinação de distancias mediante medidores eletrônicos.

A automação de atividades em levantamentos Geodésicos, em particular, no monitoramento de barragens, é uma ferramenta que acrescenta a produtividade e pode estimar de melhor forma fenômenos naturais que afetam o processo de auscultação, melhorando a representatividade e precisão dos resultados. O desenvolvimento e automação mediante *software* e código de livre acesso permitem abordar diferentes atividades da Geodésica aplicada fornecendo diferentes níveis de precisão.

## 6 RECOMENDAÇÕES

O desenvolvimento desta pesquisa fornece duas diretrizes principais, uma que vai na direção da automação na Geodésia aplicada mediante o desenvolvimento pelo próprio usuário de aplicações ou instrumentos de medição e outra linha que aborda os efeitos da temperatura em observações de distancias empregando-se medidores eletrônicos. Baseado nestas linhas de pesquisa recomenda-se:

- Estudar sistemas ou protocolos de comunicação sem fio aplicado ao envio de dados para diferentes plataformas de observação Geodésica empregadas em engenharia;
- Integração de sensores de baixo custo para atividades de monitoramento Geodésico;
- Integração de sensores para observação de outros parâmetros ambientais além da temperatura, por exemplo, velocidade do vento, pressão, umidade, entre outros;
- Modelagem da temperatura para correção de primeira velocidade, baseado no conhecimento deste parâmetro no percurso de uma onda eletromagnética;
- Controle de temperatura e refração lateral em tuneis;
- Modelagem de efeitos atmosféricos para observação de rede controle Geodésica em monitoramento de estruturas, em particular conexão de redes internas e externas;



## REFERÊNCIAS

ANGUS-LEPPAN, P. V; BRUNNER, F. K. Atmospheric temperature models for short-range E.D.M. **The Canadian Surveyor**, v. 34 (2), p. 153–165, 1980.

ARDUINO. Arduino. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/Credits>>. Acesso em: 10/9/2018a.

ARDUINO. Arduino uno. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>>. Acesso em: 5/10/2018b.

ARTERO, Ó. T. **Arduino : curso práctico de formación**. RC Libros, 2013.

BADIRU, A. B.; OMITAOMU, O. A. **Handbook of Industrial Engineering Equations, Formulas, and Calculations**. CRC Press, 2010.

BANZI, M. **Getting Started with Arduino**. III ed. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2008.

BARRELL, H; SEARS, J. The refraction and dispersion of air and dispersion of air for the visible spectrum. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 238, n. 786, p. 1–64, 1939. The Royal Society. Disponível em: <<http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/238/786/1>>.

BARZAGHI, R; CAZZANIGA, N. E; GAETANI, C. I.; DE PINTO, L; TORNATORE, V. Estimating and Comparing Dam Deformation Using Classical and GNSS Techniques. **Sensors**, 2018.

BOMFORD, G. **Geodesy**. Oxford:Oxford University Press, 1952.

BRICOGEEK. XBee 2mW (S2C) con Antena. Disponível em: <<https://tienda.bricogeeek.com/modulos-radiofrecuencia/43-xbee-2mw-serie-25-con-antena.html>>. Acesso em: 10/10/2018a.

BRICOGEEK. Sensor de temperatura TMP36. Disponível em: <<https://tienda.bricogeeek.com/sensores/346-sensor-de-temperatura->

tmp36.html?search\_query=tmp36&results=1>. Acesso em: 10/10/2018b.

BRUNNER, F. K. **Geodetic Refraction**. 1<sup>o</sup> ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1984a.

BRUNNER, F. K. Overview of Geodetic Refraction Studies. In: F. K. Brunner (Org.); **Geodetic Refraction: Effects of Electromagnetic Wave Propagation Through the Atmosphere**. p.1–6, 1984b. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-3-642-45583-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-45583-4_1)>.

BRUNNER, F. K. Refraction, refractive index and dispersion: some relevant history. **Refraction of transatmospheric signals in geodesy**. p.208, 1992.

BRUNNER, F. K; FRASER, C. S. An atmospheric turbulent transfer model for EDM reduction. **International Symposium on Electromagnetic Distance Measurement and the Influence of Atmospheric Refraction**, p. 304–317, 1977.

CASPARY, W. F.; RÜEGGER, J. M. **Concepts of Network and Deformation Analysis**. School of Surveying, University of New South Wales, 1987.

CHANG, X.; QUNGE, H. In: 9th International Conference on Electronic Measurement Instruments. 2009.

CHEN YONG, Q. **Analyssis of deformation surveys - a generalized Method**. 1983.

CR KENNEDY SURVEY, S. **LEICA Instrument EDM Specifications**. 2016.

DA CRUZ, W. **Integração de dados de monitoramento de estruturas antrópicas. Estudo de caso: uhe mauá**, 2015. Universidade Federal do Paraná.

DEUMLICH, F. **Surveying Instruments**. W. de Gruyter, 1982.

DIGI. **XBee® Zigbee® Mesh Kit**. 2016.

ENGEL, P; SCHWEIMLER, B. DABAMOS, Open Source Software

Development in Geodesy. , 2016. Neubrandenburg University of Applied Sciences.

FALUDI, R. **Building Wireless Sensor Networks: with ZigBee, XBee, Arduino, and Processing**. O'Reilly Media, 2010.

FILIPEFLOP. DS18B20. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/produto/sensor-de-temperatura-ds18b20-a-prova-dagua/>>. Acesso em: 5/10/2018.

FRASER, C. S. A simple atmospheric model for electro-optical EDM reduction. **Australian Surveyor**, v. 30, n. 6, p. 352–362, 1981. Taylor & Francis. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00050326.1981.10441211>>.

GAIRNS, C. **Development of a semi-automated system for structural deformation monitoring using a reflectorless total station**, 2008. University of New Brunswick.

GIKAS, V; DASKALAKIS, S. Determining Rail Track Axis Geometry Using Satellite and Terrestrial Geodetic Data. **Survey Review**, v. 40, n. 310, p. 392–405, 2008. Taylor & Francis. Disponível em: <<https://doi.org/10.1179/003962608X325448>>.

GRANEMANN. **Estabelecimento de uma rede geodésica para monitoramento de estruturas: estudo de caso na Usina Hidrelétrica de Salto Caxias**, 2005. Universidade Federal do Paraná.

GROOVER, M. Automation. **Handbook of Design, Manufacturing and Automation**. p.1–21, 2007. Wiley-Blackwell. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470172452.ch1>>.

HAUK, M; HIRT, C; ACKERMANN, C. Experiences with the QDaedalus system for astrogeodetic determination of deflections of the vertical. **Survey Review**, v. 49, n. 355, p. 294–301, 2017. Taylor & Francis. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00396265.2016.1171960>>.

HIRT, C; GUILLAUME, S; WISBAR, A; BÜRKI, B; STERNBERG, H. Monitoring

of the refraction coefficient in the lower atmosphere using a controlled setup of simultaneous reciprocal vertical angle measurements. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 115, n. D21. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2010JD014067>>.

HORVÁTH, K. The effect of atmospheric anomalies on Geodetic measurements. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, 1974.

INCE, C. D; SAHIN, M. Real-time deformation monitoring with GPS and Kalman Filter. **Earth, Planets and Space**, v. 52, n. 10, p. 837–840, 2000. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/BF03352291>>.

JÄGER, R; SPOHN, P. GOCA. 1999. Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft.

KENNIE, T. J. M.; PETRIE, G. **Engineering Surveying Technology**. Taylor & Francis, 1993.

KUMAR, M.; MANAS, J.; J SARMAH, M.; et al. Intelligent Localization Algorithm for Temperature Monitoring using Wireless Sensor Networks. **International Journal of Computer Applications**, 2014.

LAMB, F. **Industrial Automation: Hands On**. McGraw-Hill Education, 2013.

LUTES, J. **Automated dam displacement monitoring using a robotic total station**, 2002. University of New Brunswick.

LUTES, J; CHRZANOWSKI, A; BASTIN, G; WHITAKER, C. DIMONS software for automatic data collection and automatic deformation analysis. In: 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements. p.101–109, 2001.

MIKHAIL, M.; GORDON, G. Analysis and adjustment of survey measurements. **Canadian Journal of Statistics**, v. 11, n. 4, p. 338–339, 1983. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2307/3314893>>.

MORITZ, H; HOFMANN-WELLENHOF, B. **Geometry, Relativity, Geodesy**. Wichmann, 1993.

NADAL, M. **Controle e operação remota de estações totais robotizadas voltado à auscultação geodésica**, 2008. Universidade Federal do Paraná.

NASA. **Tour of the electromagnetic spectrum**. 2016.

OGUNDARE, J. O. **Precision Surveying: The Principles and Geomatics Practice**. Wiley, 2015.

OMIDALIZARANDI, M; PAFFENHOLZ, J.-A; NEUMANN, I. Automatic and accurate passive target centroid detection for applications in engineering geodesy. **Survey Review**, v. 0, n. 0, p. 1–16, 2018. Taylor & Francis. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00396265.2018.1456001>>.

ROBERTSON, K. D. The use of atmospheric models with trilateration. **Survey Review**, v. 24, n. 186, p. 179–188, 1977a. Taylor & Francis. Disponível em: <<https://doi.org/10.1179/sre.1977.24.186.179>>.

ROBERTSON, K. D. **Development of a high precision capability for monitoring structural movements of locks and dams**. 1977b.

RÜEGER, J. M. **Electronic Distance Measurement: An Introduction**. Springer, 1990.

SANSÒ, F.; GIL, A. J. Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles. In: IAG Symposium Jaén, Spain, March 7-19, 2005. Springer Berlin Heidelberg, 2007.

SCHOFIELD, W.; BREACH, M. **Engineering Surveying**. VI ed. Taylor & Francis, 2007.

SEUNG- WOO, L.; SUNG- HYO, Y.; HYEONG, K. DO; et al. Real- time volcano monitoring using GNSS single- frequency receivers. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 120, n. 12, p. 8551–8569. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2014JB011648>>.

SOLARIÆ, N; BARKOVIÆ, Đ; ZRINJSKI, M. Automatizacija mjerenja

atmosferaških parametara pri preciznom mjerenju duljina. **Geodetic list**. p.165–186, 2012.

SOLIMINI, D. **Understanding Earth Observation: The Electromagnetic Foundation of Remote Sensing**. Springer International Publishing, 2016.

SUCI, F. M. **Estudo sobre a estabilidade da rede geodésica de monitoramento da uhe salto caxias**, 2012. Universidade Federal do Paraná.

THOMPSON, A.; TAYLOR, B. N. **Guide for the Use of the International System of Units (SI). National Institute of Standards and Technology Special Publication 811 (2008 Edition)**. National Institute of Standards and Technology / U.S. Department of Commerce, 2008.

TORGE, W. **Geodesy**. W. de Gruyter, 2001.

UREN, J.; PRICE, W. F. **Surveying for Engineers**. Palgrave Macmillan, 2010.

VANICEK, P.; KRAKIWSKY, E. J. **Geodesy: The Concepts**. Elsevier Science, 1986.

VEIGA, L. A. K. **Sistema para Mapeamento automatizado em campo: conceitos, metodologia e implantação de um protótipo**, 2000. Universidade de São Paulo.

WILKINS, R.; BASTIN, G.; CHRZANOWSKI, A. Alert: a fully automated real time monitoring system. In: 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece, 2003., 2003.

WILSON ALCÂNTARA SOARES. **Investigação de uma modelagem matemática como alternativa para aumento da área de cobertura de estações de referência DGPS**, 2005. Universidade Federal do Paraná.

YAVAŞOĞLU, H. H.; KALKAN, Y.; TIRYAKIOĞLU, İ.; et al. Monitoring the deformation and strain analysis on the Atatürk Dam, Turkey. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 9, n. 1, p. 94–107, 2018. Taylor & Francis. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1411400>>.

ZOCOLOTTI. **Utilização de técnicas de poligonização de precisão para o monitoramento de pontos localizados em galerias de inspeção: estudo de caso da Usina Hidrelétrica de Salto Caxias**, 2005. Universidade Federal do Paraná.

ZOU, J; ZHU, Y; XU, Y; et al. Mobile precise trigonometric levelling system based on land vehicle: an alternative method for precise levelling. **Survey Review**, v. 49, n. 355, p. 249–258, 2017. Taylor & Francis. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00396265.2016.1163877>>. .